INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

PROBIÓTICOS PARA SALVAR LOS CORALES | ROBOTS ESCRITORES | EL POBLAMIENTO DE AMÉRICA

N.º 538

JULIO 2021

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Julio 2021 • N.º 538 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

AL RESCATE DEL CORAL

Una nueva estrategia para detener los efectos del cambio climático

COSMOLOGÍA

El mayor atlas del universo

ANTROPOLOGÍA

El intrincado origen de los amerindios

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

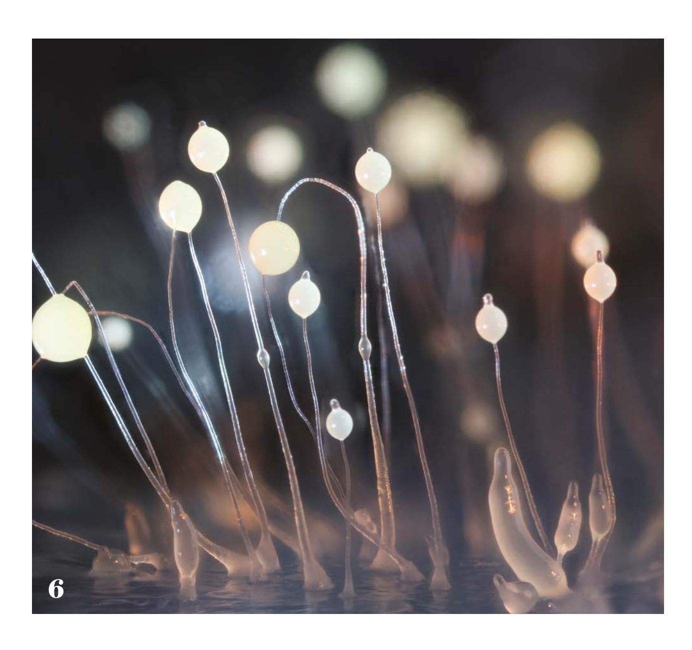
¿Puede un robot escribir como un humano?





GETTY IMAGES/DRAKULIREN/ISTOCK

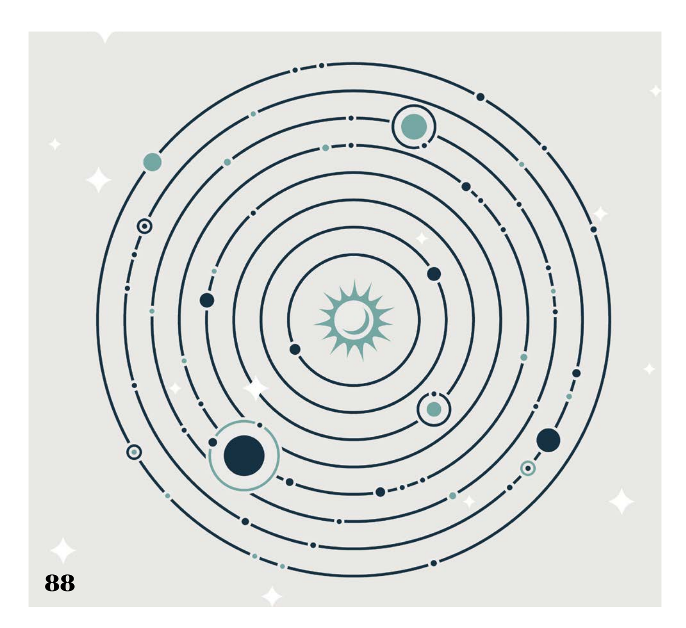
ARTÍCULOS



6



52



88

INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



Los arrecifes coralinos de todo el mundo, como la Gran Barrera de Coral, ejercen una importante influencia en la vida marina y humana. Pero el cambio climático y la acidificación de los océanos están amenazando su supervivencia y cada vez resulta más urgente salvarlos. Una de las estrategias que se están ensayando para retrasar su muerte y revertir los daños consiste en distribuir sobre ellos probióticos. Ilustración: Getty Images/DKart/iStock

redaccion@investigacionyciencia.es



Mayo 2021

CIENCIA Y ESTÉTICA

Me interesó mucho la reflexión de Francisco José Soler Gil en el artículo «El motor estético de la física» [Investigación y Ciencia, mayo de 2021]. En su recorrido por parte de la historia de las teorías científicas, el autor sostiene que la elegancia, la sencillez y la simetría han sido percibidas como belleza. Al final del artículo, introduce lateralmente el concepto de complejidad (en relación al fenómeno puntual de las fluctuaciones cuánticas) y conjetura la posibilidad de encontrar belleza también en ellas. Podría agregarse a esta argumentación que dicha reacción emocional y estética no es muy distinta de la que genera el hallazgo de orden en el mundo, cuya búsqueda es el objeto no solo de la ciencia, sino también de las religiones e incluso de las personas en nuestra vida cotidiana —quizá porque suele producir alivio tranquilizador, además de goce estético—. El postulado general parece ser que el criterio estético, en los términos antes mencionados, puede ser válido para evaluar la calidad de las teorías científicas.

Sin embargo, todas estas cuestiones se hallan en el campo de la subjetividad humana, por lo que parece lícito dirigir también la atención hacia una evaluación objetiva de la calidad de las teorías. El enfoque antropocéntrico presentado no incluye criterios objetivos de valoración de las teorías que sean independientes —y a veces opuestos— a los de la estética. Uno de ellos es la correspondencia con la realidad compleja observable en cualquier campo: cuanto más compleja es la realidad, menos sencilla resulta y, por lo general, también es menos simétrica, elegante y «bella». Un ejemplo lo hallamos en el enorme y validado corpus de conocimiento de la biología, muy fragmentado y poco elegante salvo escasos ejemplos, como la evolución darwiniana. Un segundo criterio es la consiliencia entre teorías de áreas disímiles entre sí. Por ejemplo, la biología, la química y la física comparten sin discrepancias los mismos conceptos, y las validaciones de nuevas teorías en una de ellas que se sostengan también en las de otras fortalecerán a todas, con independencia de cualquier consideración estética.

Entre otros, estos dos criterios objetivos parecerían indicios de la calidad de las teorías más sólidos que su belleza. La que, por supuesto, no deja de ser una maravilla.

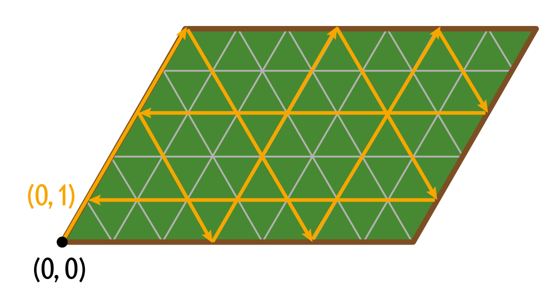
Jorge Hintze
Universidad Nacional del Litoral
Argentina

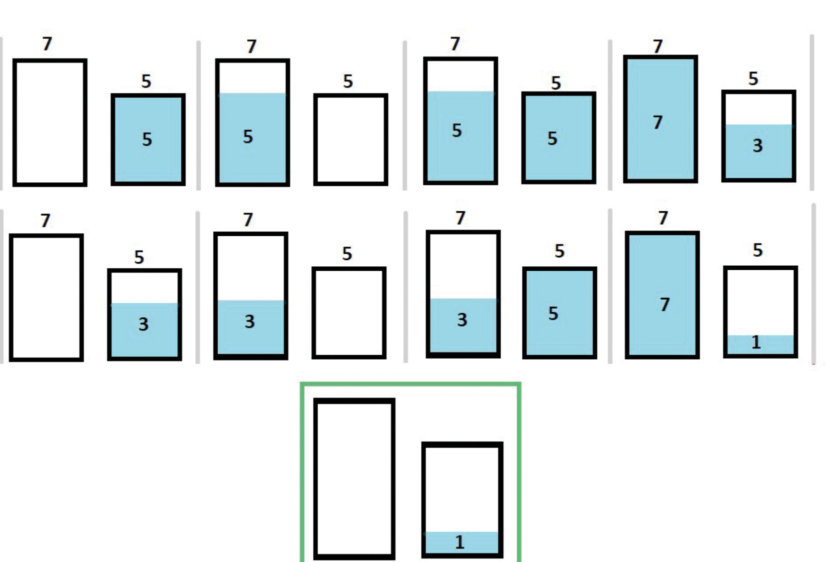
Responde Soler Gil: *Gracias por la atenta lectura del artículo. Concuerdo en que hay otros criterios, además de los estéticos, que influyen en la evaluación de las teorías. Pero me gustaría subrayar que puede defenderse con argumentos verosímiles que los criterios estéticos no son meramente subjetivos, sino que el canon estético de los físicos de una época se va configurando a partir de los rasgos de las teorías más exitosas del momento. De manera que la sensibilidad estética resulta, hasta cierto punto, una forma rápida e intuitiva de filtrar hipótesis prometedoras por su similitud con ideas que ya han probado su éxito. El filósofo James McAllister se ocupó extensamente de este tema en su obra* Beauty and revolution in science *(Cornell University Press, 1996) y yo mismo lo he tratado de forma resumida en el capítulo 5 de mi ensayo* El enigma del orden natural *(Senderos, 2020).*

BILLAR MATEMÁTICO

Soy una chica de 15 años muy interesada por la ciencia. Me ha gustado mucho el artículo de Bartolo Luque «El billar como computador analógico» [Investigación y Ciencia; mayo de 2021]. En el ejemplo del billar romboidal con las garrafas de 5 y 7 litros, he encontrado una manera alternativa de conseguir un litro con menos pasos. Adjunto cómo lo he hecho.

Rocío Perales Valdés
Las Rozas, Madrid





ROCÍO PERALES VALDÉS, MODIFICADO POR *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA* (*billar*); ROCÍO PERALES VALDÉS (*vasos*)

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Valencia 307, 3.º 2.ª, 08009 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes



Fumigación de un campo de coliflores con DDT en California, un plaguicida de amplio uso en 1937.



SALUD AMBIENTAL

La alargada sombra del DDT

Se han detectado afecciones en los nietos de las mujeres que estuvieron expuestas al plaguicida

Calificado como milagroso en la década de 1950, el potente insecticida DDT (diclorodifeniltricloroetano) prometía librar al mundo del paludismo, del tifus y de otras enfermedades transmitidas por insectos. En sus anuncios, los fabricantes lo promovían como un «benefactor de la humanidad». Los estadounidenses aplicaron más de 1350 millones de toneladas (casi 3,5 kilogramos por habitante) a cultivos, céspedes y animales domésticos en sus hogares, antes de que la bióloga Rachel Carson y otros lanzaran la voz de alarma sobre su impacto en el ser humano y la fauna. La entonces joven Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA) lo prohibió en 1972.

Los amigos y familiares de Barbara Cohn suelen preguntar a esta epidemióloga del Instituto de Salud Pública de Berkeley por qué estudia los efectos de este plaguicida, prohibido hace tantos años. Su respuesta es que el DDT continúa acosando al cuerpo humano. En trabajos precedentes, descubrió que las hijas de las mujeres expuestas a niveles muy elevados de este insecticida durante el embarazo presentaban índices elevados de cáncer de mama, hipertensión y obesidad.

El último estudio de Cohn, sobre los nietos de las mujeres expuestas, constituye la primera prueba de que los efectos perjudiciales del DDT persisten al menos durante tres generaciones. La investigación vincula los altos índices de exposición de las abuelas al índice de masa corporal (IMC) elevado y a la menarquia precoz en las nietas, aspectos ambos que presagian problemas de salud en el futuro.

«Este estudio lo cambió todo», asegura Michele Marcus, epidemióloga de la reproducción de la Universidad Emory, ajena a la nueva investigación. «Desconocemos si otros compuestos [sintéticos y de larga vida], como las sustancias perfluoroalquiladas, tendrán un impacto multigeneracional, pero este trabajo obliga a investigar la cuestión.» En su opinión, solo tales estudios a largo plazo permitirán esclarecer todas las consecuencias del DDT, así como de otros compuestos sintéticos con efectos disruptores, y orientar las normativas.

BETTMANN Y GETTY IMAGES

A finales de la década de 1950, Jacob Yerushalmy, bioestadístico de la Universidad de California en Berkeley, propuso una investigación ambiciosa para seguir a decenas de miles de embarazadas y valorar de qué modo la exposición intrauterina podía afectar a la salud en la adolescencia y la edad adulta. El Estudio de Desarrollo y Salud Infantil (CHDS, por sus siglas en inglés) siguió a más de 20.000 embarazadas de la región de la bahía de San Francisco entre 1959 y 1966. El grupo de Yerushalmy tomó muestras de sangre durante la gestación, en el parto y a los recién nacidos al mismo tiempo que recababa datos sociológicos, demográficos y médicos de las madres y de sus hijos.

Cohn tomó el timón del CHDS en 1997 y comenzó a usar los datos de aquellos niños, entonces cercanos a la mediana edad, para investigar los factores ambientales que se escondían detrás del aumento del cáncer de mama. Una posibilidad era la exposición intrauterina a un grupo de sustancias clasificadas como disruptores endocrinos, como el DDT.

Las glándulas endocrinas humanas segregan hormonas y otros mensajeros químicos que regulan funciones esenciales, desde el crecimiento y la reproducción hasta el hambre y la temperatura corporal. Un disruptor endocrino interfiere con este sistema refinado. Muchos fármacos, como el antibiótico triclosán o el antiabortivo dietilestilbestrol, actúan como tales, al igual que productos industriales como el bisfenol A y los bifenilos policlorados, e insecticidas como el DDT. «Estas sustancias piratean nuestras señales moleculares», afirma Leonardo Trasande, director del Centro para la Investigación de Riesgos Ambientales de la Universidad de Nueva York, que no ha participado en el estudio.

Gracias a las decenas de miles de muestras del CHDS que se conservan congeladas desde hace décadas, Cohn y sus colaboradores pudieron medir el DDT acumulado en la sangre materna para determinar el grado de exposición de los fetos. En una serie de estudios relacionaron esa concentración con la salud cardíaca de los niños, ahora en la mediana edad, y con los índices de cáncer de mama.

El feto engendra todos los óvulos antes de nacer, así que Cohn sospecha que la exposición prenatal al DDT también podría afectar a la descendencia de los hijos, esto es, los nietos de las participantes del CHDS. Con un promedio de 26 años de edad este año, las nietas son jóvenes para sufrir cáncer de mama, pero podrían padecer otras enfermedades cuyo riesgo aumenta en las siguientes décadas de vida.

Con 258 tríos de madre-hija-nieta, el equipo de Cohn descubrió que las nietas de las mujeres situadas en el tercio superior de exposición al DDT durante el embarazo tenían una probabilidad 2,6 veces mayor de presentar un IMC poco saludable. También tenían el doble de probabilidad de que la menarquia se produjera antes de cumplir los 11 años. Ambos factores agravan el riesgo de sufrir cáncer de mama y enfermedades cardiovasculares en el futuro, explica Cohn. Estos resultados, publicados en *Cancer Epidemiology, Biomarkers, and Prevention*, constituyen la primera prueba de que los riesgos para la salud derivados del DDT abarcan tres generaciones humanas.

Akilah Shahib, de 30 años, cuya abuela formó parte del estudio CHDS y que participa en la presente investigación, opina que los resultados son un duro recordatorio de que los problemas de salud actuales pueden tener su origen décadas atrás. «El DDT estaba disperso en el ambiente y escapaba al control de mis abuelos. Y no fue la única sustancia así», afirma.

Para Andrea Gore, toxicóloga de la Universidad de Texas en Austin, los nuevos resultados son poco menos que revolucionarios. «Este es el primer estudio realmente robusto que muestra ese tipo de consecuencias multigeneracionales», afirma Gore, que no ha participado en el estudio.

Los estudios de laboratorio, entre ellos uno de Cohn en 2019, han revelado que los efectos del DDT y de otros disruptores endocrinos se transmiten durante varias generaciones a través de cambios epigenéticos, que alteran la activación y la inactivación de los genes. Cohn también investiga en este momento los efectos multigeneracionales de otros disruptores endocrinos, como el bisfenol A y los compuestos polifluorados.

Investigaciones de ese tipo también sacan a relucir la necesidad de ensayos a largo plazo para confirmar la seguridad de los productos químicos, afirma Trasande. Gore coincide y argumenta que las autoridades deberían exigir ensayos más rigurosos sobre los efectos de los disruptores endocrinos; mientras se investigan los mecanismos específicos por los cuales estos influyen en la salud de varias generaciones, añade, deberían analizarse sistemáticamente las marcas distintivas de tales influencias en los estudios toxicológicos in vitro.

«Este estudio recalca el imperativo de que algo así no vuelva a ocurrir jamás», concluye Trasande.

—Carrie Arnold

BIOLOGÍA CELULAR

Amebas contra la EPOC

Unos habitantes microscópicos del suelo contribuyen a la lucha contra esta mortífera dolencia

La enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), que abarca el enfisema, la bronquitis crónica y otros trastornos respiratorios, es una de las primeras causas de muerte en los países occidentales. No existe tratamiento que la prevenga o la cure. Pero, gracias a las amebas, un nuevo estudio ha descubierto un conjunto de genes que podría ayudar a proteger las células pulmonares del daño y quizás anular los síntomas.

«Atiendo a pacientes con EPOC, así que esto era algo muy importante para mí», afirma la autora principal del estudio Corrine Kliment, investigadora de neumopatías y médica en la Universidad de Pittsburgh. En busca de genes que pudieran ser útiles, Kliment y su equipo recurrieron a la ameba del suelo *Dictyostelium discoideum*.

Las amebas y el ser humano poseen numerosos genes en común, pero el ciclo biológico de estos seres microscópicos es mucho más corto, así que permiten reconocer con rapidez genes de interés antes de pasar al estudio con los modelos de mamíferos. «Solemos bromear con que las personas somos poco más que amebas con pelo», me explica uno de los coautores, Douglas Robinson, investigador de la Universidad Johns Hopkins.

En torno a tres cuartas partes de las muertes por EPOC están vinculadas con el tabaquismo. Así que el laboratorio de Robinson analizó en cuatro breves semanas 35.000 amebas, cuyos genes habían sido modificados para producir en exceso varias proteínas y ver si alguna de ellas protegía a las amebas de los perjuicios del humo. Cuando las expusieron al extracto de humo de cigarrillo, comprobaron que las amebas a las que les iba mejor eran aquellas que estaban sobreproduciendo ciertas proteínas importantes para el metabolismo celular.

Acto seguido observaron esas mismas proteínas en células pulmonares humanas y de ratón. Descubrieron que las células procedentes de fumadores con EPOC y de ratones expuestos mucho tiempo al humo producían poca cantidad de una de ellas, la proteína ANT2.

También les sorprendió comprobar que la ANT2 parece desempeñar otra función, no vinculada al metabolismo. Observando las células pulmonares al microscopio, vieron que esta proteína se acumula en la superficie celular alrededor de las proyecciones filiformes denominadas cilios, que se mueven de un lado a otro para despejar el moco de los pulmones. En la EPOC, los cilios no se mueven bien; el moco se acumula y acaba causando insuficiencia respiratoria. Kliment y sus colaboradores han descubierto que la ANT2 fomenta la hidratación, lo que facilita el barrido del moco por los cilios. Han publicado sus resultados en *Journal of Cell Science*.

Kliment, Robinson y otros pretenden desarrollar fármacos y terapias génicas que aumenten la producción de ANT2, con la esperanza de que esto reduzca la acumulación de moco y revierta los síntomas de la EPOC. Robinson y otros colaboradores trabajan en este momento en la creación de una empresa que usará las amebas para seleccionar posibles sustancias terapéuticas, entre ellas algunas para la EPOC.

Gregg Duncan, investigador de neumopatías en la Universidad de Maryland y ajeno al estudio, afirma que es optimista con que este trabajo pueda ayudar a los enfermos de EPOC: «Es agradable conocer que hay posibilidades de anular los síntomas de forma más duradera».

—Sam Jones



Dictyostelium discoideum en su estado de cuerpo fructífero.

SISTEMA SOLAR

Una nueva Luna

Las primeras muestras lunares que llegan a la Tierra en 45 años tienen una historia que contar

Este verano, los científicos chinos empezarán a analizar las muestras lunares de la misión Chang'e 5, las primeras que llegan a nuestro planeta desde 1976. Estos especímenes podrían obligar a redefinir la cronología del satélite y también la de otros cuerpos de nuestro sistema planetario, por lo que también la comunidad científica internacional está deseando echarles un vistazo.

La misión Chang'e 5, cuya cápsula de retorno de muestras llegó a la Tierra el pasado diciembre, recogió en torno a 1,7 kilos de suelo y rocas del océano de las Tormentas, en la parte noroccidental de la cara visible. Y aunque las imágenes orbitales sugieren que la corteza de esa región se formó hace unos 1500 millones de años, esa relativa juventud no casa bien con los modelos informáticos. Estos indican que, para entonces, un cuerpo pequeño como la Luna ya tendría que haber perdido el calor interno remanente de su formación, el cual es necesario para impulsar la actividad volcánica que renueva la superficie.

A falta de muestras procedentes de esa región, hasta ahora los científicos habían calculado su edad contando los cráteres de impacto, una técnica aplicable a cualquier cuerpo planetario sólido y que se basa en el hecho de que, cuanto más antigua sea una superficie, más cráteres presentará. Entre 1969 y 1976, las misiones estadounidenses y soviéticas tomaron muestras de la zona ecuatorial, nororiental y septentrional. Estas revelaron que aquellas superficies contaban entre 3000 y 4000 millones de años edad, lo que supuso «una verificación de campo para los modelos de recuento de cráteres», señala Julie Stopar, geomorfóloga del Instituto Lunar y Planetario de Houston. Sin embargo, esas rocas corresponden solo a las regiones más antiguas. «Hasta ahora carecíamos de muestras de cualquier cosa que haya ocurrido hace entre 3000 y 1000 millones de años», continúa la experta.

Si los nuevos especímenes resultasen ser más jóvenes de lo que sugieren los modelos de recuento de cráteres, «eso significará que debemos corregir toda la cronología de la Luna. Se trata de algo bastante fundamental», afirma Jim Head, planetólogo de la Universidad Brown. Otras mediciones, como las relativas a la radiactividad, podrían ayudar a explicar una actividad más prolongada de los volcanes lunares. Conocer esa historia será clave para datar no solo la evolución de la Luna, sino también la de Mercurio, Marte, la Tierra y otros cuerpos.

Entre julio y agosto finalizará el plazo de seis meses del que disponían los científicos chinos para solicitar las muestras. Después, el país asiático tiene previsto abrir las peticiones a equipos científicos internacionales, explica Head. Las entidades financiadas por la NASA tienen prohibido trabajar directamente con China debido a la enmienda Wolf, un veto que el Congreso estadounidense estableció hace un decenio. Sin embargo, es posible hacer excepciones, y otras agencias no estarán sujetas a la prohibición. A Head, por su parte, le gustaría ver un intercambio de muestras de las misiones Apolo y Chang'e 5. «Tengo la esperanza de que en un futuro no muy lejano podamos realizar canjes de ese tipo», concluye el investigador.

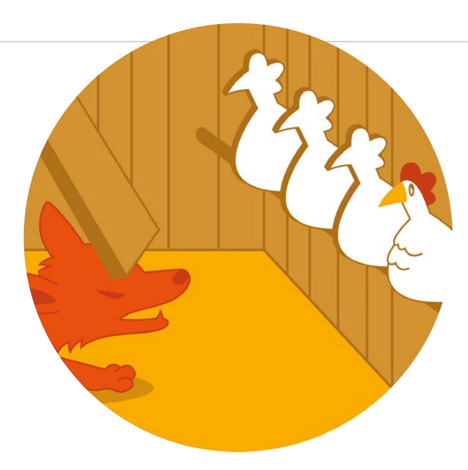
—Irene Klotz

TYLER LARSEN (CC BY SA 4.0), HTTPS://COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:DICTYOSTELIUM_DISCOIDEUM_FB_2.JPG

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Falsificaciones protectoras

Un algoritmo genera documentos falsos para confundir a los ciberdelincuentes



Los piratas informáticos mejoran constantemente su capacidad de burlar los sistemas de ciberseguridad para robar documentos valiosos. Por ello, algunos investigadores se han propuesto usar la inteligencia artificial para confundirlos y ocultar la información que debe protegerse bajo un alud de falsificaciones convincentes.

El algoritmo, llamado Motor de Generación de Repositorios Falsos en Línea mediante Vectorización de Palabras (WE-FORGE), genera señuelos de patentes en desarrollo. Pero algún día podría crear «numerosas versiones falsas de todos los documentos que una empresa considere que debe salvaguardar», explica V. S. Subrahmanian, desarrollador del programa y experto en ciberseguridad del Colegio Universitario Dartmouth, en Nuevo Hampshire

Si, por ejemplo, los piratas intentaran conseguir la fórmula de un nuevo fármaco, tendrían que buscar primero la aguja adecuada entre un pajar de falsificaciones. Eso podría obligarlos a comprobar con detalle cada fórmula y, quizás, a invertir en algunas recetas infructuosas. «El quid de la cuestión es ponérselo más difícil», explica Subrahmanian. «Hacer sufrir a quien quiere robarte.»

Subrahmanian relata que emprendió este proyecto tras leer en un estudio sobre seguridad informática que las empresas tardan una media de 312 días en detectar los nuevos tipos de ciberataques. «El malhechor tiene casi un año para esfumarse con todos nuestros documentos y propiedad intelectual», subraya. «Aunque seas [una compañía del tamaño de] Pfizer, ese tiempo basta para robar casi todo. Ya no son solo las joyas de la corona, sino también las de la criada y el reloj del secretario.»

Los documentos falsos que genera WE-FORGE podrían también servir como «detonadores ocultos», afirma Rachel Tobac, directora general de la consultora de ciberseguridad SocialProof Security. Por ejemplo, un archivo atractivo podría hacer saltar una alarma cuando alguien acceda a él. Las empresas generalmente han usado esta estrategia con falsificaciones elaboradas por humanos. «Pero ahora, si la inteligencia artificial es capaz de hacerlo por nosotros, podremos crear una gran cantidad de nuevos documentos que resulten creíbles a un atacante sin tener que trabajar más», añade Tobac, quien no participó en el proyecto.

Para producir señuelos convincentes, el sistema busca las palabras clave de un documento. Cuando encuentra una, calcula una

MEDIOAMBIENTE

Archivo de narval

Los cuernos de este cetáceo conservan pruebas del calentamiento del Ártico

El cuerno del narval atesora décadas de información ambiental y muestra a las claras los cambios que está experimentando el Ártico, describe un estudio publicado en *Current Biology*. Cada año el cuerno espiral se engrosa con una nueva capa, que incorpora los isótopos de carbono y nitrógeno y una parte del mercurio que el animal consume. Los autores compraron diez cuernos a cazadores inuits del noroeste de Groenlandia y descubrieron que albergaban casi medio siglo de información.

Poder acceder a esa larga serie de datos «supone un gran paso en el conocimiento de los factores que influyen en aspectos tales como la alimentación o el [nivel de] mercurio», explica el autor principal Jean-Pierre Desforges, biólogo marino de la Universidad McGill.

Los investigadores cortaron los cuernos (en realidad, colmillos hechos de dentina), pulverizaron una parte y analizaron el contenido de isótopos en las muestras. De los resultados se puede deducir en qué lugares y qué ha comido el narval, así como su exposición al mercurio, un potente veneno cuya acumulación afecta a los sistemas inmunitario y reproductor de los animales.

Desde los años 60 hasta los 90 del siglo pasado, cuando gran parte del hábitat de los narvales estaba cubierto por la banquisa de hielo, los isótopos del carbono y del nitrógeno indicaban que estos cetáceos comían peces situados en lo alto de la cadena trófica, como el fletán (*Hippoglossus hippoglossus*). Pero desde que la extensión de la banquisa comenzó a descender en picado, a partir de 1990, el perfil isotópico del carbono empezó a cambiar. Este indica un cambio en la



THOMAS FUCHS (*inteligencia artificial*); AGEFOTOSTOCK Y ALAMY STOCK PHOTO (*narval*)

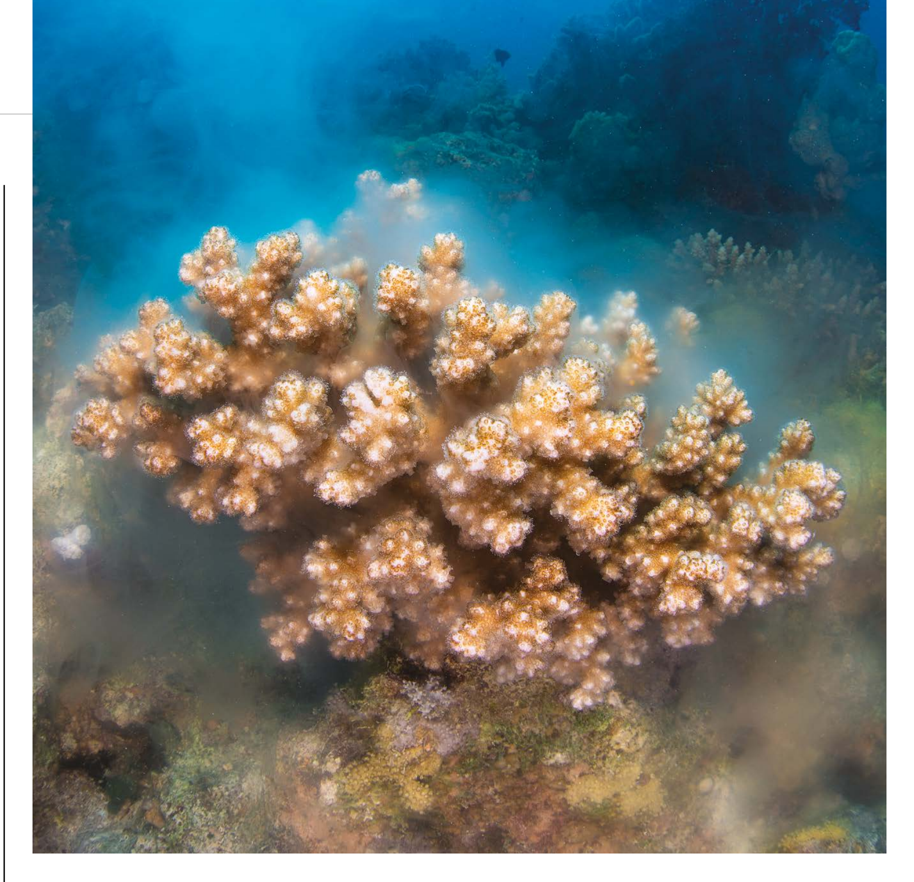
lista de conceptos relacionados y sustituye el término original por uno elegido al azar. El proceso puede generar decenas de documentos que no contienen información confidencial pero que resultan perfectamente verosímiles. Los investigadores pidieron a doctorandos de química e informática que evaluaran patentes reales y falsas en sus respectivas disciplinas, y los estudiantes encontraron creíbles los documentos generados por WE-FORGE. Los resultados se publican en *ACM Transactions on Management Information Systems*.

WE-FORGE podría llegar a ampliar su ámbito de aplicación, aunque Subrahmanian advierte que un documento que recomiende una serie de medidas, por ejemplo, sería mucho más difícil de falsificar que uno que contenga una fórmula técnica. Aun así, tanto él como Tobac piensan que la investigación atraerá interés comercial. «Puedo imaginar que las organizaciones aprovechen este tipo de producto», comenta Tobac. «Si consigue generar señuelos creíbles que no revelen detalles comprometidos, creo que será un gran triunfo.» *—Sophie Bushwick*

alimentación, con peces propios del mar abierto y deshelado, como la saida (*Boreogadus saida*) o el capelán (*Mallotus villosus*), situados unos escalones más abajo de la cadena y, por tanto, con menos contenido de mercurio. Aun así, los narvales siguieron ingiriendo cantidades importantes de este metal tóxico. Los autores afirman que podría ser consecuencia del cambio climático o del aumento de las emisiones, o de una combinación de ambos factores.

Los cambios en las fuentes de alimento influyen en los contaminantes con que entran en contacto los narvales y la disponibilidad de nutrientes, lo que podría ocasionar alteraciones en la demografía de este cetáceo. De forma más general, la investigación demuestra que el colmillo del narval puede servir como un indicador del modo en que la región y sus habitantes están reaccionando al cambio climático, afirma Cortney Watt, bióloga marina de la Universidad de Manitoba y experta en cetáceos que no ha participado en esta nueva investigación. «Creo que son buenos indicadores de lo que se está cociendo en el ambiente. Un archivo fiable de lo que ha ocurrido y lo que está ocurriendo en el Ártico», concluye.

—Susan Cosier



ALEX MUSTARD, NATURE PICTURE LIBRARY

BIOLOGÍA

Corales in vitro

El cultivo de células coralinas en el laboratorio revelaría claves sobre su estado de salud

El estudio de los corales requiere normalmente su observación en vivo en el medio marino o el examen de los tejidos muertos en el laboratorio. Ahora, una nueva investigación ofrece un modo de mantener vivos todos los tipos de células coralinas en un cultivo in vitro durante dos semanas o más, lo que abre nuevas posibilidades experimentales.

Las células de los cnidarios, grupo al que pertenecen los corales y las anémonas de mar, son especialmente difíciles de cultivar. Las células se dañan fácilmente durante la extracción, y los corales albergan microbiomas complejos que cuesta erradicar con antibióticos y que si sobreviven suelen invadir los cultivos celulares [*véase* «Probióticos para salvar el coral», por Elizabeth Svoboda *en este mismo número*].

Numerosos cnidarios están amenazados y son esenciales para la salud de los ecosistemas marinos. «Hemos de hacer algo más que dar cuenta de su desaparición», afirma Nikki Traylor-Knowles, bióloga marina de la Universidad de Miami y una de las autoras de un novedoso estudio publicado en *Scientific Reports*. En él, su equipo detalla el modo de reducir un coral a las células que lo forman y, a continuación, multiplicarlas juntas; sería como cultivar un animal en una placa de Petri.

Los investigadores retocaron un medio habitual de crecimiento (compuesto por agua de mar, productos químicos y antibióticos) para obtener fórmulas óptimas para dos especies de cnidario. Estas fórmulas permiten cultivar a la vez todos los tipos de células de cada especie, sin microbios ni tejidos extraños. La nueva metodología brindará una visibilidad sin precedentes en cuanto a la interacción entre los tipos celulares, asegura Traylor-Knowles, y permitirá experimentos de más entidad sin sacar ni destruir colonias enteras.

Todavía no se conocen todos los tipos de células de los cnidarios, menos aún sus funciones. Estos cultivos podrían mostrarnos cómo responden las diversas células a los factores estresantes, qué tipos son más vulnerables a los problemas de salud y, posiblemente, cuál es el origen de su asombrosa capacidad de regeneración.

En opinión del biólogo molecular Juris Grasis, de la Universidad de California en Merced, que no ha participado en el estudio pero investiga los cnidarios, el trabajo es revolucionario. No oculta que sintió «envidia malsana» cuando conoció el resultado. Destaca que algunas poblaciones de células sobrevivieron hasta 30 días, lo que anticipa la posibilidad de aumentar la reproducción celular en investigaciones futuras. Y, a continuación, Grasis se pregunta: «¿Cómo trasladamos esto a la práctica y restituimos la salud de los corales?»

—Hannah Seo

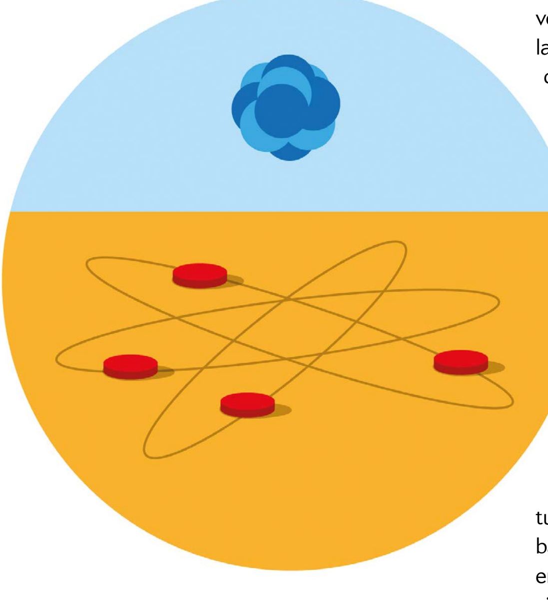
MATERIALES

Electrones en 2D

Observan un comportamiento bidimensional en un superconductor de tres dimensiones

Aunque la idea de un mundo oculto regido por leyes físicas exóticas parezca sacada de la ciencia ficción, los científicos acaban de descubrir un universo ignoto y aplanado en el seno de un material superconductor. En un artículo publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, un equipo de investigadores ha anunciado que los electrones de cierto material tridimensional se comportan como si el espacio tuviera solo dos dimensiones.

Nuestra vida transcurre en tres dimensiones espaciales. A pesar de ello, hace tiempo que los científicos saben diseñar materiales tan delgados que, de manera efectiva, se comportan como si solo tuvieran dos dimensiones. Sin embargo, no es eso lo que ahora han hecho los investigadores. Mientras trabajaban con un superconductor de bario, plomo, bismuto y oxígeno, hallaron algo extraño: aunque la muestra era plenamente tridimensional, al examinarla con un microscopio de efecto túnel hallaron que los electrones ignoraban la tercera dimensión y se confinaban en superficies perfectamente planas. «Los electrones superconductores adoptaron esa configuración bidimensional de manera espontánea, sin necesidad de ningún cambio físico o químico ni de ninguna preparación específica», señala Carolina Parra, primera autora del artículo y física de la Universidad Técnica Federico Santa María, en Valparaíso.



Los científicos ya habían considerado la posibilidad de que los electrones de dicho material presentaran un comportamiento bidimensional que no eran capaces de medir. Eso es lo que el nuevo trabajo ha confirmado de manera directa al «obtener información sobre los parámetros físicos de la muestra a escala atómica», explica Hari Manoharan, coautor del estudio y físico del Laboratorio Nacional de Aceleradores SLAC, en California.

Las planicies electrónicas reveladas por el nuevo trabajo constituyen prometedores bancos de pruebas para examinar las teorías que intentan explicar la superconductividad, asegura Nandini Trivedi, física de la Universidad Estatal de Ohio que no participó en la investigación. Trivedi estudia casos en los que los electrones de superconductores muy delgados forman islas de partículas estrechamente ligadas. El grupo de Manoharan observó que los electrones de su material se autoorganizaban del mismo modo y, de hecho, mostraban ese peculiar comportamiento en mayor medida que los materiales planos.

Determinar con precisión la dinámica de los electrones de un superconductor podría también impulsar el desarrollo de nuevos materiales de este tipo. La mayoría de superconductores conocidos hoy en día solo funcionan como tales si se enfrían a temperaturas del orden de unos 200 grados Celsius bajo cero, lo que limita sus aplicaciones. Sin embargo, los físicos aún ignoran qué alteraciones deberían producirse en general en tales materiales para que pudieran superconducir a temperatura ambiente, señala Paula Giraldo Gallo, física de la Universidad de los Andes en Bogotá y coautora del estudio. Algunos de los grupos de electrones estrechamente ligados que se observaron en el nuevo trabajo parecen superconducir a temperaturas inesperadamente altas. «Este material presenta el potencial de ser un superconductor de alta temperatura», explica Giraldo Gallo, «pero aún desconocemos la causa». La respuesta podría radicar en el mundo bidimensional revelado por el nuevo estudio.

—*Karmela Padavic-Callaghan*

EPIDEMIOLOGÍA

¿Qué virus animales amenazan a los humanos?

Un proyecto innovador predice el riesgo de zoonosis

Mucho antes de que la COVID-19 apareciera, los científicos ya trabajaban en descubrir los virus animales con más probabilidades de afectar al ser humano. Fruto de esos esfuerzos, se ha elaborado una plataforma digital llamada SpillOver que clasifica el riesgo de que diversos virus consumen el salto entre especies. Sus creadores esperan que la nueva herramienta ayude a los especialistas en salud pública y a las autoridades competentes a evitar epidemias en el futuro.

Jonna Mazet, epidemióloga y ecóloga de enfermedades en la Universidad de California en Davis, ha dirigido la labor durante más de una década. Todo comenzó con el proyecto PREDICT, de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), con el que se pretendía ir más allá de los vigilados virus de la gripe y detectar otros patógenos emergentes que entrañasen riesgo para las personas. Miles de científicos peinaron 35 países en busca de virus animales, descubriendo muchos nuevos durante el proceso. Pero no todos los virus son igual de amenazantes, de modo que Mazet y sus colaboradores decidieron crear un esquema para interpretar sus resultados. «Queríamos pasar de la mera colección con fines científicos [el simple descubrimiento de los virus] a la evaluación y reducción real del riesgo», explica.

Al equipo le sorprendió la gran escasez de investigaciones dedicadas a la clasificación de los virus que en la actualidad afectan únicamente a animales pero que pertenecen a familias que probablemente causen enfermedades en el ser humano. Así que comenzaron desde cero e identificaron 32 factores pertenecientes a los virus animales (como la vía de contagio), a los hospedadores (como su número y variedad) y al ambiente (densidad de población humana, frecuencia de la interacción con los hospedadores, etcétera). Estos se resumen en una escala de riesgo de 155 puntos, en la que una mayor puntuación significa un mayor riesgo de zoonosis.

El virólogo Colin Parrish, de la Universidad Cornell, que no ha participado en el estudio, afirma que los factores examinados fueron importantes en saltos anteriores. Pero

THOMAS FUCHS

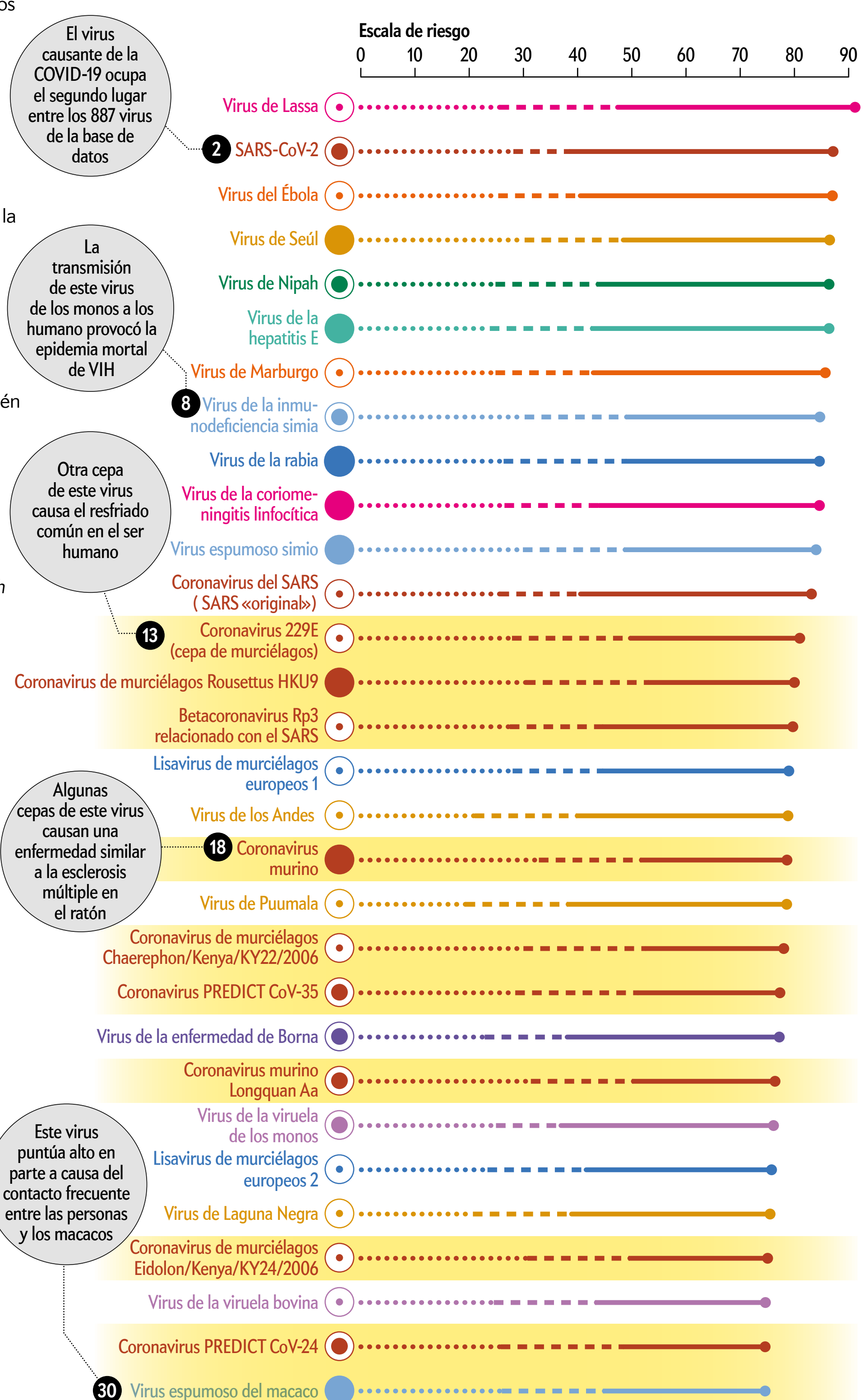
subraya que el riesgo de salto de una especie a otra puede agravarse por factores impredecibles que surjan después. «Es un poco como la bolsa», compara.

En el nuevo estudio, publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, se clasifican 887 virus animales. Doce que son patógenos para el ser humano ocupan los primeros puestos, con el virus causante de la COVID-19 en segundo lugar, solo superado por el virus de Lassa, que infecta a las ratas. (Mazet puntualiza que la gripe encabezaría la lista si hubiera sido incluida, pero las variantes gripales ya son objeto de vigilancia por otras instituciones.) Parrish destaca que la lista tampoco incluye los virus transmitidos por insectos y por los animales domesticados.

SpillOver está abierta a la edición pública, y científicos de todo el mundo ya están haciendo aportaciones con sus resultados. Mazet espera que también capte la atención de los profesionales y las autoridades de salud pública. Afirma también que con acciones selectivas «podemos asegurarnos de que no surjan esas zoonosis. Pero si se producen, estaremos preparados porque estaremos vigilantes». —*Harini Barath*

Los 30 primeros virus, por riesgo de contagio zoonótico

Cada virus está clasificado en virtud de la puntuación de riesgo, que es la suma de tres valores vinculados a factores del propio virus, de su hospedador y del ambiente. Los virus de la gripe no figuran en la clasificación porque su potencial zoonótico ya ha sido ampliamente estudiado.



INTERPRETACIÓN DE LA GRÁFICA

Los colores indican las familias víricas

- Arenavirus
- Coronavirus
- Filovirus
- Bunyavirus
- Paramixovirus
- Herpesvirus
- Retrovirus
- Rabdovirus
- Bornavirus
- Poxvirus

Los círculos coloreados muestran la distribución geográfica, los lugares donde se ha descubierto el virus en la fauna

- Nacional o regional
- Semimundial
- Mundial

El tipo de línea indica los componentes de la escala de riesgo

- Hospedador (*puntos*)
- Ambiente (*discontinua*)
- Virus (*continua*) Total

El resaltado indica la situación en cuanto al riesgo de zoonosis

- Posible nueva amenaza
- Virus zoonótico conocido (*no resaltado*)

FUENTE: SPILLOVER (HTTPS://SPILLOVER.GLOBAL): DATOS DEL 7 DE ABRIL DE 2021. GRÁFICO DE AMANDA MONTAÑEZ

EVOLUCIÓN HUMANA

¿Fueron asimilados los neandertales por nuestra especie?

Los últimos datos genómicos permiten suponer que los últimos neandertales no fueron sustituidos por los humanos modernos, sino absorbidos por ellos

CARLES LALUEZA FOX



NUMEROSOS DATOS señalan que los neandertales vivían en pequeños grupos familiares. El genoma antiguo de cuatro humanos modernos europeos contiene elementos neandertales de incorporación reciente, lo cual indica que el cruce con ellos fue habitual.

GETTY IMAGES/GORODENKOFF/ISTOCK

En la región occidental de Eurasia, los restos de humanos anatómicamente modernos de la supuesta época de contacto con los neandertales, en el Pleistoceno tardío (hace entre 40.000 y 50.000 años), se cuentan con los dedos de la mano. Solamente se han obtenido abundantes datos genómicos de dos de ellos: el hombre de Ust-Ishim, en Siberia occidental, y el de Oase 1, en Rumanía, con una antigüedad de 45.000 años y entre 37.000 y 42.000 años, respectivamente. Por esta razón, sabemos poco sobre las afinidades genéticas y las dinámicas demográficas de los primeros humanos modernos que se asentaron en Eurasia.

En cambio, hay más neandertales de la misma época de los cuales se han obtenido datos a escala genómica. Son los hallados en los yacimientos de Les Cottés (Francia), Spy (Bélgica), Goyet (Bélgica), Vindija (Croacia), Mezmáiskaya (Rusia) y El Sidrón (Asturias).

Y hace poco se ha publicado el genoma de otros cuatro europeos modernos. En un artículo publicado en *Nature*, Mateja Hajdinjak, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva, en Leipzig, y sus colaboradores han presentado los datos de los polimorfismos mononucleotídicos (SNP) en el genoma de tres individuos procedentes de la cueva de Bacho Kiro, en Bulgaria; y en *Nature Ecology & Evolution*, Kay Prüfer, del Instituto Max Planck para la Ciencia de la Historia Humana, en Jena, y sus colaboradores han descrito el genoma de una mujer de Zlatý Kůň, en la República Checa. Con una antigüedad fechada por radiocarbono de entre 42.580 y 45.930 años, los restos de Bacho Kiro corresponden a los europeos modernos más antiguos de los que se dispone de datación fehaciente. Pese a los repetidos intentos, no se han podido fechar los restos de Zlatý Kůň mediante radiocarbono, pero los datos moleculares indican que tienen más de 45.000 años, de modo que pertenecen al cráneo más antiguo que se ha conservado casi íntegro en el continente, y posiblemente son contemporáneos a los habitantes de Bacho Kiro.

Las relaciones genéticas de estos nuevos genomas con las poblaciones humanas actuales revelan una diferencia sorpren-



YACIMIENTOS CON FÓSILES de los que se han obtenido datos de todo el genoma, en el supuesto período de contacto entre los neandertales y los humanos modernos, hace entre 40.000 y 50.000 años (*los círculos azules corresponden a neandertales; los rojos, a humanos modernos*; 1, El Sidrón, Asturias; 2, Spy, Bélgica; 3, Goyet, Bélgica; 4, Les Cottés, Francia; 5, Vindija, Croacia; 6, Mezmáiskaya, Rusia; 7, Oase 1, Rumanía; 8, Zlatý Kůň, Rep. Checa; 9, Bacho Kiro, Bulgaria; 10, Ust-Ishim, Rusia).

dente entre ambos yacimientos: Zlatý Kůň no aportó nada a los europeos y asiáticos modernos, como tampoco Oase 1, aunque de este último solo contamos con datos de SNP, así que no sabemos si podría pertenecer a la misma población que la de Zlatý Kůň; en cambio, los individuos de Bacho Kiro están relacionados con poblaciones orientales y americanas posteriores. Esta intrigante heterogeneidad demuestra la existencia de poblaciones humanas diferenciadas en el Paleolítico superior. Para entender mejor la expansión de los humanos modernos por Eurasia, sin duda hará falta secuenciar más genomas antiguos.

Parientes neandertales cercanos

La genética nos ofrece información sobre ancestralidad, pero también ilumina la historia demográfica de las poblaciones antiguas y sus entrecruzamientos. Gracias al estudio de su genoma, sabemos que los neandertales sufrieron un largo declive demográfico —antes incluso de sus encuentros con los humanos modernos—, mientras que nuestra especie creció de forma ininterrumpida desde el éxodo africano de hace unos 65.000 años. Además, muchos datos genéticos, arqueológicos y paleoantropológicos señalan que los neandertales vivían en pequeños grupos familiares con una endogamia acumulada y, en algunos casos, una marcada consanguinidad.

Por el contrario, los primeros humanos modernos del Paleolítico superior, incluidos algunos individuos fechados poco después del período de contacto, como los de Kostenski 14 o los de Sunguir, ambos yacimientos rusos, no muestran signos de endogamia. En la línea de lo expuesto ahora por Hajdinjak y Prüfer, estos hallazgos hacen pensar que las primeras poblaciones de humanos modernos eran sustancialmente mayores que las de los neandertales, y que sus redes sociales eran más extensas.

Dos genomas publicados anteriormente de humanos modernos del Pleistoceno tardío (Ust-Ishim y Oase1), contienen fragmentos de ADN neandertal notablemente más largos que las poblaciones actuales (Oase1 tenía un ancestro neandertal entre cuatro y seis generaciones atrás). Los genomas de humanos modernos que se han secuenciado ahora contienen la misma señal: todos ellos tenían ancestros neandertales muy recientes; un varón de Bacho Kiro, menos de seis generaciones antes. Esto indica que la introgresión de ADN neandertal en el genoma de los humanos modernos del Pleistoceno tardío habría sido habitual.

Curiosamente, por ahora no se ha detectado la señal contraria, es decir, la cesión de genes de humanos modernos a los neandertales. Quizá sea porque los humanos modernos toleraban los híbridos pero los neandertales, no; o quizá porque los neandertales repudiaban a los individuos mestizos. También es posible que su ausencia se deba, sencillamente, a la mayor fragmentación demográfica o incluso a diferencias genéticas. De hecho, las secuencias del cromosoma Y de algunos neandertales revelan mutaciones que podrían explicar la incompatibilidad de híbridos de padre neandertal. Habrá que investigar si estas coincidencias representan diferencias fundamentales en cuestiones como la cultura y la estructura social o si solo reflejan incompatibilidades biológicas.

El hallazgo sistemático de ancestralidad neandertal reciente en los humanos modernos del Pleistoceno tardío indica que los cruces no eran la excepción, sino la regla. Los nuevos datos genómicos permiten suponer que los últimos neandertales no fueron sustituidos por los humanos modernos, sino absorbidos por ellos. La señal neandertal del genoma habría quedado diluida en el acervo genético del Paleolítico superior por las diferencias demográficas y, más adelante, por la llegada de sucesivas poblaciones con menos ascendencia neandertal. Entre los muchos cambios que ha habido últimamente en el marco conceptual de la evolución humana, este podría ser uno de los más espectaculares.

Carles Lalueza Fox *dirige el Laboratorio de Paleogenómica en el Instituto de Biología Evolutiva, de la Universidad Pompeu Fabra y el CSIC.*

Artículo original publicado en *Nature Ecology & Evolution*, vol. 5, págs. 711-712, 2021
Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2021

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Initial upper palaeolithic humans in Europe had recent neanderthal ancestry. Mateja Hajdinjak et al. en *Nature*, vol. 592, págs. 253-257, abril de 2021.
A genome sequence from a modern human skull over 45,000 years old from Zlatý Kůň in Czechia. Kay Prüfer et al. en *Nature Ecology & Evolution*, abril de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

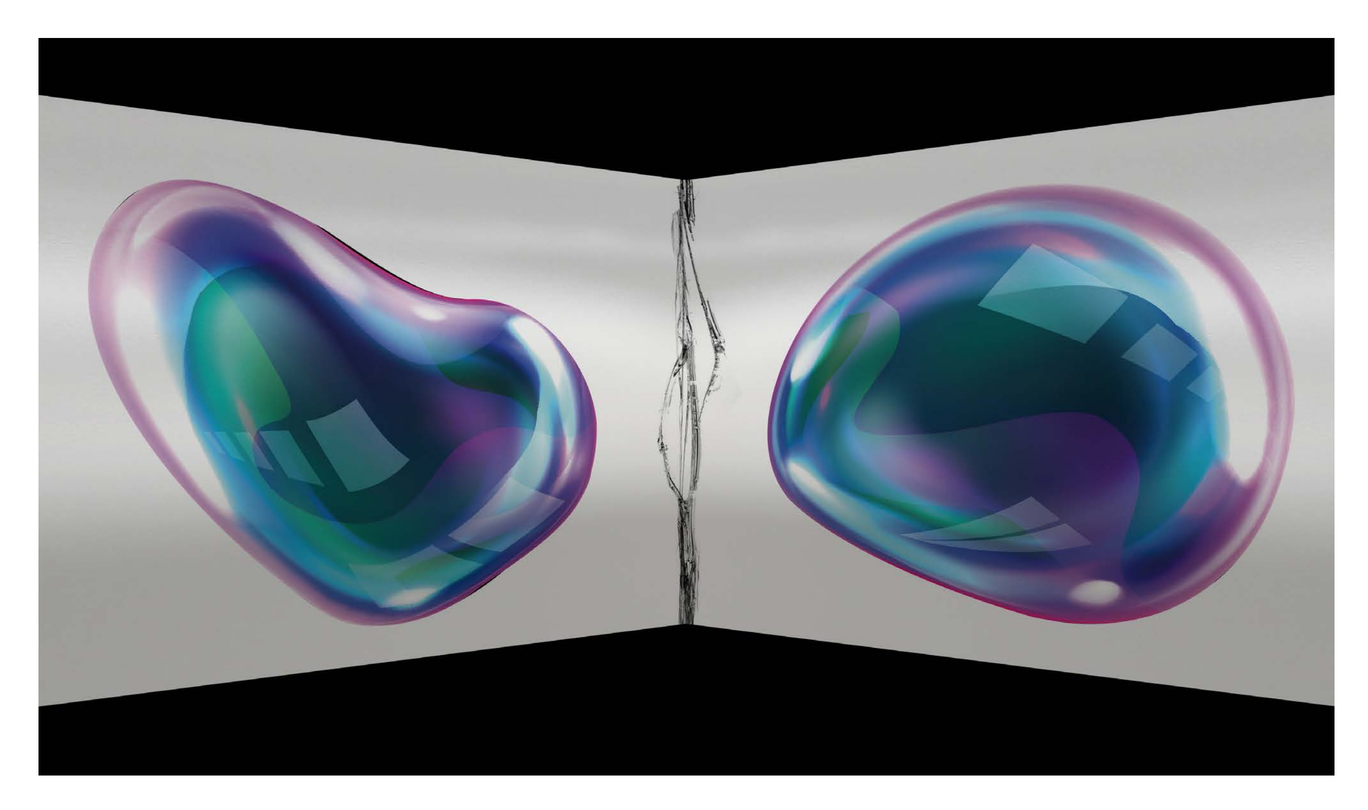
Neandertales y humanos modernos en la península ibérica: encuentros y desencuentros. Manuel Vaquero Rodríguez en *IyC*, octubre de 2018.
Nuestra herencia neandertal. Kate Wong en *IyC*, septiembre de 2010.

FÍSICA NUCLEAR

Cuando la forma rompe la simetría

Un trabajo halla una inesperada diferencia en la estructura de dos núcleos atómicos que deberían ser casi idénticos. El resultado no concuerda con los modelos vigentes de física nuclear

KATHRIN WIMMER, ALEJANDRO ALGORA Y BERTA RUBIO



ESPEJO ROTO: Una simetría clave en física nuclear y física de partículas predice que ciertos núcleos atómicos con distinto número de protones y neutrones deberían tener la misma forma. Un experimento reciente ha hallado una sorprendente violación de dicho fenómeno.

GETTY IMAGES/KLYAKSUN/ISTOCK/INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

El núcleo atómico, tal y como lo entendemos hoy, puede considerarse un interesante laboratorio natural. Es un sistema donde se manifiestan tres de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza y, al tener un número variable de constituyentes, ofrece una oportunidad única para estudiar las relaciones entre ellas. De hecho, las consecuencias de estudiar el núcleo atómico van más allá de entender mejor este sistema concreto. Un ejemplo lo hallamos en la llamada «simetría de isospín», un concepto introducido originalmente en física nuclear pero que luego demostraría ser de gran utilidad en otros campos de la física.

Esta idea clave se remonta a 1932, año que los historiadores de la ciencia consideran el *annus mirabilis* de la física nuclear. Fue cuando James Chadwick descubrió el neutrón, y también cuando Werner Heisenberg propuso una idea revolucionaria: que el protón y el neutrón podían entenderse como dos estados cuánticos de una misma partícula, el nucleón.

Por extraña que pueda parecer, esta idea puede comprenderse con facilidad si consideramos el espín ordinario. En el caso de un electrón, su espín puede tomar dos valores (+1/2 y –1/2), los cuales indican sendos estados de su momento angular intrínseco. Por tanto, el espín ordinario nos permite distinguir entre dos estados físicamente diferenciados del electrón. De manera análoga, Heisenberg propuso asociar al nucleón un «isospín», T, el cual podía tomar también dos valores: $T = +1/2$ correspondería al estado que identificamos como neutrón, mientras que $T = -1/2$ correspondería al protón. La idea unificaba de manera natural las propiedades de estas partículas y, entre otras cosas, explicaba por qué ambas parecían tener la misma masa.

La simetría de isospín ha sido durante décadas una guía fundamental para entender el comportamiento de los núcleos atómicos y la dinámica de la interacción nuclear fuerte. Sin embargo, en un trabajo reciente publicado en *Physical Review Letters*, los autores de este artículo y otros colaboradores hemos observado una violación inesperada de esta simetría. En concreto, dos núcleos que deberían tener la misma forma atendiendo al isospín han resultado ser marcadamente distintos. El hallazgo choca con los modelos actuales de la física nuclear y señala la necesidad de entender mejor aquellos núcleos que

contienen un número similar de protones y neutrones.

Una simetría fértil

Las fuerzas nucleares dictan la manera en que protones y neutrones interaccionan entre sí en el núcleo atómico. Ya en el trabajo original de Heisenberg puede intuirse que la interacción nuclear no «ve» si la partícula sobre la que actúa posee carga eléctrica o no; es decir, si se trata de un protón o de un neutrón. Sin embargo, no fue hasta unos años más tarde, en 1937, cuando Eugene Wigner propuso explotar esta suposición al máximo y postuló que la formulación matemática del núcleo atómico debía ser invariante bajo «rotaciones de isospín»; es decir, bajo transformaciones que convirtiesen un protón en un neutrón, y viceversa.

El trabajo de Wigner consiguió relacionar las propiedades de núcleos con distinto número de protones y neutrones. En particular, la idea puede aplicarse a los llamados «núcleos espejo», aquellos con idéntica cantidad de nucleones pero que se diferencian por el intercambio de protones y neutrones. Un ejemplo lo hallamos en los núcleos de kriptón-70 y selenio-70. El primero consta de 36 protones y 34 neutrones, mientras que el segundo contiene 34 protones y 36 neutrones. Por tanto, intercambiar la identidad de estas partículas equivale a transformar un núcleo en otro.

Al igual que los átomos, también los núcleos poseen distintos niveles de energía y pueden experimentar transiciones entre ellos. Y la idea de Wigner implica que, en los núcleos espejo, las energías de determinados estados deberían ser similares y que sus transiciones deberían estar relacionadas. Este resultado dista de ser obvio y constituye una consecuencia de la simetría de isospín en la interacción fuerte.

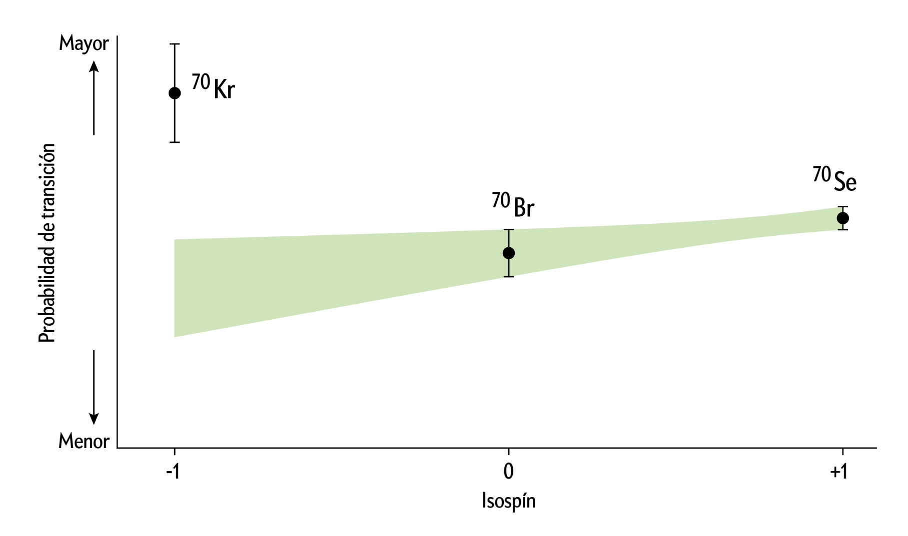
A pesar de su gran utilidad, hoy sabemos que la simetría de isospín no es perfecta, sino que presenta cierto grado de ruptura. En los núcleos atómicos pueden observarse pequeñas diferencias en los ni-

Esta variación brusca de forma entre dos núcleos espejo supone un resultado totalmente inesperado y constituye el primer caso en que se ha observado una violación de la simetría de isospín en la dinámica de las reacciones nucleares



CORTESÍA DE PIETER DOORNENBAL/LABORATORIO RIKEN

AL IGUAL QUE LOS ÁTOMOS, también los núcleos poseen distintos niveles de energía. Un experimento efectuado en el Centro Nishina del laboratorio japonés RIKEN ha estudiado por primera vez las transiciones entre ciertos niveles del núcleo de kriptón-70. El instrumento DALI2 (*fotografía*), compuesto por 186 detectores centelleadores de yoduro de sodio, permite detectar la radiación gamma emitida por estos núcleos cuando pasan de un estado excitado a su estado fundamental. Tales medidas revisten gran interés ya que guardan relación con la forma del núcleo atómico.



LOS NÚCLEOS de selenio-70 (34 protones y 36 neutrones) y kriptón-70 (36 protones y 34 neutrones) están relacionados por la llamada «simetría de isospín», la cual intercambia el número de protones y neutrones. Dicha simetría implica que las probabilidades de transición entre varios estados energéticos de estos núcleos y el de bromo-70 (35 protones y 35 neutrones) deberían ser muy similares. Sin embargo, las mediciones muestran una diferencia significativa entre las expectativas teóricas (*verde*) y las probabilidades de transición observadas (*negro*). El resultado indica que estos núcleos tendrían geometrías muy distintas, algo que los modelos vigentes no consiguen explicar.

veles energéticos debidas a la interacción electromagnética, la cual solo actúa sobre los protones. Sin embargo, la simetría de isospín presenta también una cierta ruptura en el marco de la propia interacción nuclear fuerte.

Si el protón y el neutrón fuesen dos estados de una misma partícula, ambos deberían tener exactamente la misma masa. No obstante, sabemos que el neutrón es ligeramente más pesado que el protón, una propiedad que hace que, cuando se encuentra aislado, se desintegre espontáneamente en unos 15 minutos. El protón, en cambio, parece ser completamente estable. Pero esa diferencia de masas entre el protón y el neutrón es muy pequeña, de apenas el 0,14 por ciento, por lo que la simetría de isospín, aunque aproximada, sigue siendo un recurso válido para estudiar el núcleo atómico. No en vano, esta simetría y su grado de ruptura constituyen una herramienta esencial para investigar la naturaleza de la interacción fuerte en el medio nuclear.

La simetría de isospín no solo ha demostrado ser de gran interés en física nuclear, sino que ha sido un concepto de gran relevancia en física de partículas. En los años cincuenta, el isospín fue fundamental para entender por qué determinados procesos en física de partículas eran más probables que otros. Y el desarrollo histórico de la idea contribuyó a introducir los quarks y a entender sus propiedades, lo que condujo al modelo estándar de la física de partículas tal y como lo conocemos hoy.

Una ruptura inesperada

Nuestro trabajo se centró en estudiar las transiciones entre varios niveles energéticos de tres núcleos: kriptón-70, selenio-70 (dos núcleos espejo) y bromo-70, este último formado por 35 protones y 35 neutrones. De ellos, el kriptón-70 es el menos estable (se desintegra en apenas 40 milisegundos) y, por tanto, el más difícil de producir. Con anterioridad a nuestro trabajo solo se habían estudiado las transiciones correspondientes en los núcleos de selenio-70 y bromo-70.

Tales mediciones requieren generar un haz de kriptón-70 en su estado fundamental (el de menor energía) y hacerlo incidir sobre una lámina de oro, lo que provoca que los núcleos experimenten una transición a un nivel de mayor energía. Eso nos llevó a realizar el experimento en el Centro Nishina del laboratorio japonés RIKEN, donde se producen los haces de kriptón-70 más intensos del mundo. Para ello, un haz primario del isótopo kriptón-78, acelerado al 70 por ciento de la velocidad de la luz, se hace incidir sobre un blanco. La colisión genera núcleos de kriptón-70 (en nuestro caso, a un ritmo de 14 por segundo) que, después, deben identificarse y separarse.

Tras impactar contra la lámina de oro, el instrumento DALI2, compuesto por 186 detectores de rayos gamma, registra los fotones emitidos por los núcleos cuando estos regresan espontáneamente del estado excitado al fundamental. A partir de tales datos es posible inferir las probabilidades de transición entre los distintos niveles energéticos. Y conocer tales probabilidades es importante, ya que se encuentran relacionadas con una característica esencial de todo núcleo atómico: su forma.

Quizá la imagen más común que tengamos del núcleo atómico sea la de una gota esférica formada por protones y neutrones. Aunque este modelo permite explicar numerosas propiedades, la situación es en realidad más compleja. La mayoría de los núcleos que conocemos no presentan forma esférica, sino de elipsoide (similar a un limón), mientras que unos pocos adoptan la geometría de una esfera achatada por los polos (como una mandarina). Ambas constituyen «formas de equilibrio»; es decir, asociadas al mínimo de energía debido a las interacciones entre los nucleones.

Pero es el grado de deformación, o cuánto se aleja la geometría del núcleo de la forma esférica, lo que determina las propiedades de las transiciones nucleares. Si la simetría de isospín fuera exacta, cabría esperar que las formas de dos núcleos espejo fuesen idénticas y que, por tanto, las transiciones entre sus niveles de energía estuvieran claramente relacionadas entre sí.

Al comparar las transiciones energéticas de los núcleos de kriptón-70, bromo-70 y selenio-70, nuestro trabajo halló una inesperada desviación con respecto a lo que cabría esperar a partir de la simetría de isospín. En concreto, las probabilidades de transición en el núcleo de kriptón-70 resultaron ser muy distintas de lo previsto. ¿Cómo explicarlo?

La razón de esta anomalía solo puede deberse a un cambio brusco en la forma de los núcleos estudiados. Una posibilidad es que el núcleo de kriptón-70 se aleje mucho más de la geometría esférica que su núcleo espejo, el selenio-70, y presente una forma muy distinta a la de este. Dicha variación brusca de forma entre dos núcleos espejo supone un resultado totalmente inesperado y constituye el primer caso en el que se ha observado una violación de la simetría de isospín en la dinámica de las reacciones nucleares;

es decir, en un proceso relacionado con transiciones entre estados excitados en una reacción nuclear.

¿Nuevos modelos?

¿A qué puede deberse esta inesperada asimetría? La zona de la tabla de núcleos que hemos estudiado es particular, algo que en parte se encuentra relacionado con la complejidad de la estructura nuclear en sistemas en los que el número de protones y neutrones es similar. La manera tradicional de explicar un cambio de forma se basa en que la interacción entre protones y neutrones genera una polarización, o «marea», que deforma el núcleo. Sin embargo, en los núcleos con una cantidad muy similar de protones y neutrones, los estados energéticos disponibles para unos y otros son los mismos o muy parecidos, por lo que su solapamiento es mayor. Como consecuencia, tales efectos de polarización son mucho más drásticos.

Con todo, hoy por hoy no existe ningún modelo nuclear capaz de predecir el grado de deformación necesario para dar cuenta de los resultados de nuestros experimentos. Esto parece indicar que, al menos en esta zona de la tabla de núcleos, los modelos actuales no serían del todo correctos y el uso de la simetría de isospín podría no ser completamente válido.

En estos momentos estamos analizando datos de desintegraciones beta en este tipo de núcleos con el objetivo de obtener más información al respecto. Al mismo tiempo, otros grupos experimentales están empleando la misma técnica usada en nuestro trabajo para obtener más datos, y varios grupos teóricos están buscando posibles explicaciones y mejoras en los modelos actuales.

Kathrin Wimmer *investiga en el Instituto de Estructura de la Materia de Madrid (CSIC) y en la Universidad de Tokio.*
Alejandro Algora *y* ***Berta Rubio*** *investigan en el Instituto de Física Corpuscular, un centro mixto del CSIC y la Universidad de Valencia.*

PARA SABER MÁS

The role of isospin symmetry in collective nuclear structure. D. D. Warner, M. A. Bentley y P. Van Isacker en *Nature Physics*, vol. 2, págs. 311-318, mayo de 2006.
Test of isospin symmetry along the $N = Z$ line. S. M. Lenzi y M. A. Bentley en *The Euroschool Lectures on Physics with Exotic Beams*, vol. III, págs. 57-98. Springer, 2009.
Shape changes in the mirror nuclei ^{70}Kr and ^{70}Se. K. Wimmer et al. en *Physical Review Letters*, vol. 126, art. 072501, febrero de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Núcleos con forma de pera. C. J. (Kim) Lister y Jonathan Butterworth en *IyC*, enero de 2014.
Una diferencia de masas trascendental. Frank Wilczek en *IyC*, septiembre de 2015.



CONSERVACIÓN

Probióticos para

Se están ensayando cócteles de bacterias diseñados para mejorar la supervivencia de los corales

Elizabeth Svoboda

AUNQUE LOS CORALES DEL MAR ROJO pueden soportar temperaturas muy elevadas, también ellos empiezan a padecer estrés térmico debido al cambio climático.

salvar el coral



Elizabeth Svoboda es periodista científica especializada en biología y psicología.



Pastinacas y tiburones de arrecife de puntas blancas se deslizan ante los visitantes

que mantienen la distancia social en el gigantesco acuario AquaRio, en Río de Janeiro. En un laboratorio situado en el piso superior se está realizando un nuevo experimento, gracias al cual los científicos esperan mejorar las posibilidades de supervivencia de los arrecifes coralinos de todo el mundo.

En la cuarta planta, 20 acuarios rectangulares de unos 20 centímetros de largo se disponen formando una cuadrícula. Cada uno de ellos alberga una abigarrada colección de fragmentos de coral. Los investigadores suministran a algunos de ellos cócteles de probióticos, consistentes en mezclas de bacterias diseñadas para mejorar su supervivencia en condiciones desfavorables.

El investigador João Rosado pipetea un líquido turbio, se detiene frente a uno de los tanques y presiona el émbolo, vertiendo la mezcla en el agua. «¿Puede ver eso, como si fuera humo?», me indica a través de la mascarilla Pedro Cardoso, un colaborador de Rosado adscrito a la Universidad Federal de Río de Janeiro. «Son bacterias.» Cardoso me habla a través de un sistema de vídeo instalado por el equipo y así puedo ver el proceso de modo remoto. La nube bacteriana, de color gris, envuelve al coral como un sudario y se deposita sobre él. Poco después, Rosado suministrará al coral de otros acuarios probióticos en el interior de rotíferos (criaturas marinas microscópicas de las que los corales se alimentan con sus bocas diminutas). Los corales en un tercer grupo de tanques recibirán ambos tratamientos y los alojados en un cuarto grupo, ninguno. Los investigadores observarán a los corales durante las próximas semanas para determinar si estos tratamientos mejoran su salud.

El empleo de rotíferos constituye una estrategia nueva para aplicar bacterias «buenas» a corales que sufren estrés. Los resultados del experimento, realizado en diciembre de 2020, darán pistas sobre si resulta viable ofrecer probióticos a los corales silvestres para así incrementar su supervivencia frente a las altas temperaturas y las enfermedades que los amenazan. Las investigaciones de Rosado y Cardoso, lideradas por el biólogo marino Gustavo Duarte, se basan en los trabajos previos de su mentora, Raquel Peixoto, quien publicó los primeros experimentos con probióticos en 2015. La experta lidera un audaz y controvertido plan de administrar bacterias en el medio natural, lo que podría provocar cambios en todo el ecosistema. Planea aplicarlas en el mar Rojo a finales de este año, y algunos grupos conservacionistas están deseosos de ampliar el alcance de la idea. Aunque junto con sus colaboradores ha realizado numerosas pruebas en el laboratorio y restringirá cuidadosamente sus primeros ensayos en mar abierto, Peixoto sostiene que los corales se hallan tan amenazados que «ha llegado el momento de correr riegos».

Los arrecifes coralinos cubren unos 285.000 millones de kilómetros cuadrados del fondo marino en todo el mundo. La mayoría se concentra en una docena de barreras coralinas principales, pero su influencia sobre la vida marina y humana se extiende por todo el planeta. Casi una cuarta parte de las especies pasa al menos una parte de su vida en ellos. Los arrecifes amortiguan los efectos de los temporales y del oleaje que destruyen las zonas costeras. También alimentan a millones de personas y generan unos ingresos de casi 20.000 millones de dólares anuales gracias al turismo.

Y, sin embargo, los arrecifes coralinos de todo el mundo se hallan posiblemente en estado terminal. Los científicos observaron el blanqueo masivo de los corales por primera vez en 1983, un síntoma de que pasan hambre, y desde la década de 1990 han vinculado ese fenómeno a los cambios de la temperatura del mar. Entre 1987 y 2019, los océanos se han calentado un 450 por ciento más que entre 1955 y 1986. Desde 1980, el 94 por ciento de los arrecifes coralinos ha experimentado al menos un evento de blanqueo severo. La Gran Barrera de Coral ha sufrido tres de ellos en los últimos cinco años. Un informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente afirma que hacia 2034 la mayoría de los arrecifes del planeta sufrirán un episodio anual de blanqueo, principalmente debido al calentamiento del océano, y que, sin ayuda, habrán desaparecido en 2100. La muerte generalizada de los arrecifes coralinos probablemente ocurrirá incluso si las naciones empiezan a controlar las emisiones de carbono. Para invertir la tendencia «tenemos una ventana temporal muy estrecha, de una década», afirma Carlos M. Duarte, ecólogo marino en la Universidad Rey Abdullah de Ciencia y

EN SÍNTESIS

Los arrecifes coralinos de todo el mundo sufren un blanqueo masivo como consecuencia del cambio climático y el calentamiento de los océanos.

Para salvarlos, una estrategia prometedora consiste en aplicar sobre ellos probióticos. Estas mezclas de bacterias seleccionadas podrían volverlos resistentes al estrés ambiental, reforzar su salud y protegerlos de enfermedades y de la pérdida de tejidos.

Aunque se debate sobre los efectos inesperados de los probióticos en la naturaleza, algunos expertos insisten en que, si no se actúa pronto, los corales se perderán para siempre en muchas zonas.

PÁGINAS ANTERIORES: MICHAEL BERUMEN Y MORGAN BENNETT-SMITH



BRETT MONROE GARNER, GETTY IMAGES

LOS CORALES BLANQUEADOS, como estos de la Gran Barrera de Coral, frente a Cairns, en Australia, son vulnerables a la desnutrición y a enfermedades que los pueden matar.

Tecnología (KAUST), en Arabia Saudí (y, con anterioridad, en el Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, del CSIC). «La ventana se está cerrando con rapidez.»

Los científicos que desarrollan los probióticos los ven como algo más que un simple parche para retrasar la muerte de los arrecifes. Creen que con ellos pueden revertir parte del daño que ya se ha causado, permitir el florecimiento de arrecifes antaño amenazados y reforzar las nuevas variedades de corales artificiales que se trasplantarán a los arrecifes degradados. «Suena muy drástico», afirma Rebecca Vega Thurber, ecóloga microbiana marina de la Universidad Estatal de Oregón. Pero añade que «con un diseño experimental correcto y bien implementado, podría ser útil».

Sin embargo, varías preguntas permanecen aún sin respuesta. ¿Se diluirán y perderán los probióticos al ser aplicados en el mar? ¿Se disparará el coste de unas técnicas costosas e intensivas en mano de obra cuando se empleen en arrecifes de cientos de kilómetros de longitud? Incluso sus mayores defensores reconocen el riesgo. Al fin y al cabo, el tratamiento de los arrecifes suena a geoingeniería, como lo es espolvorear el mar con hierro para estimular el crecimiento de las algas que captan el dióxido de carbono, o liberar aerosoles en el aire para reflejar al espacio los rayos solares y mitigar así el calentamiento global. Sembrar los arrecifes con bacterias podría alterar los ecosistemas marinos de un modo profundo.

Algunos expertos temen que ciertas bacterias puedan causar nuevas epidemias en los arrecifes, una posibilidad que surgió tras algunos de los experimentos recientes realizados en el laboratorio. Y nadie sabe cómo se verá afectado el resto de la red trófica, como los peces y los cangrejos que se alimentan de pólipos coralinos.

Tal como sucede con el cambio climático, las perspectivas de futuro para los arrecifes son tan malas que muchos conservacionistas creen que hacen falta soluciones extremas. «No es cómodo para un científico verse implicado en esto», afirma Peixoto, ahora microbióloga marina en KAUST. Pero, según ella, la decisión es clara. «Hemos de actuar. De lo contrario, será demasiado tarde.»

RESTAURAR EL ARRECIFE

Desde la década de 1970 se vienen realizando esfuerzos para reparar los arrecifes dañados. En el 2000, Baruch Rinkevich, del Instituto Nacional Israelí de Oceanografía, puso en funcionamiento uno de los primeros criaderos destinados a producir corales jóvenes con el fin de trasplantarlos a arrecifes afectados por la pesca, el buceo o los temporales.

Desde entonces, se han estado buscando medidas específicas para reparar los efectos del blanqueo. En un estudio de 2010, investigadores del Laboratorio Marino Mote, en Florida, demostraron que al romper corales sanos en fragmentos pequeños y colocarlos en tanques en el laboratorio, lograban desencadenar en ellos una respuesta vigorosa que los convertía en poco tiempo en corales jóvenes. (Los corales pueden reproducirse de forma sexual liberando ovocitos y espermatozoides al océano, o de forma asexual mediante gemación, que en esencia es una forma de clonación). En 2018 y 2019, investigadores de México e Israel emplearon la técnica concebida en Mote para producir fragmentos de coral y trasplantarlos en arrecifes de la costa del Pacífico mexicano. Los nuevos corales que se desarrollaron a partir de ellos presentaron una sorprendente tasa de supervivencia, del 60 por ciento, a pesar de los efectos perjudiciales del huracán Willa. En los arrecifes de Florida, los fragmentos generados por el equipo de Mote se han fusionado en grandes colonias y, en 2020, empezaron a desovar en el medio natural.

La cría en cautividad es otra estrategia. Al menos desde 2015, los científicos del Instituto Australiano de Ciencias Marinas (AIMS) y de otras instituciones han intentado seleccionar en el laboratorio los llamados supercorales, portadores de genes que ayuden a los animales a soportar el estrés. El equipo del Laboratorio Gates del Coral, en la Universidad de Hawái, está creando corales ultrarresilientes mediante evolución asistida: selecciona corales silvestres con las características genéticas de-



LA INVESTIGADORA KELLY PITTS aplica una pasta que contiene un único probiótico sobre corales frente a la costa de Florida. Alberga la esperanza de ayudar a estos organismos a luchar contra la enfermedad de la pérdida de tejido de los corales (*1*). En otra inmersión, bombea líquido en un coral cercano (*2*).

HUNTER NOREN, LABORATORIO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y ECOLOGÍA ESPACIAL, UNIVERSIDAD NOVA SOUTHWESTERN (*1, 2*)

seadas, tales como la capacidad para sobrevivir a elevadas temperaturas del agua marina, y luego los cruza en el laboratorio para producir descendientes que combinen dichas características. Un estudio realizado en 2020 en AIMS demostró que los corales así creados tenían 26 veces más probabilidades de sobrevivir a temperaturas extremas que otros corales.

Otra estrategia para ayudar a los corales consiste en favorecer su reproducción. En 2017, un equipo de la Academia de Ciencias de California, de Nature Conservancy y de SECORE International (una organización conservacionista), empezó a colectar óvulos y espermatozoides liberados al mar por corales saludables durante unas pocas pero predecibles noches al año. Los investigadores completaron la fecundación en el laboratorio y trasplantaron las larvas a otros arrecifes.

Todas estas técnicas comparten una limitación irremediable: quienes trabajan en restauración deben primero manipular los corales en el laboratorio y luego mejorar los métodos para trasplantarlos a arrecifes con problemas, un proceso lento y caro. Sería más rápido si pudiéramos suministrar el tratamiento directamente a los corales en la naturaleza. Esto llevó a Peixoto y otros investigadores a fijarse en los probióticos. Además, los corales procedentes de la cría selectiva en cautividad o regenerados por fragmentación se podrían tratar con probióticos para, al menos en teoría, hacerlos más resistentes al calor o las enfermedades antes de trasplantarlos al mar.

Los corales son constelaciones de miles de animales llamados pólipos, cada uno de ellos menor que la uña del meñique. Cada pólipo alberga bacterias, algas, hongos y otros microorganismos, denominados en conjunto microbioma. Igual que los microbios del tubo digestivo humano, estos diminutos residentes cumplen tareas esenciales para el funcionamiento de todo el sistema. En los últimos años, los análisis metagenómicos, es decir, la secuenciación de los genes de los microbios de los pólipos, han proporcionado una visión más clara de estas tareas. Científicos del Instituto Tecnológico de Massachusetts, del Instituto Oceanográfico Woods Hole y de otras instituciones han aislado bacterias que consumen el exceso de nitrógeno y evitan así la proliferación de algas que, de lo contrario, competirían con el pólipo por otros recursos. Otros microorganismos consumen las especies reactivas de oxígeno, pues estas moléculas dañan las células del coral, o ayudan al coral a captar oxígeno, que este empleará para obtener energía. Del mismo modo en que los microbios del tubo digestivo humano contribuyen a digerir el alimento y mejoran nuestra nutrición y nuestra salud, algunos expertos especulan con la posibilidad de que los microorganismos de los corales hagan más resistente al hospedador ante el estrés ambiental, al reforzar su salud global y proteger al pólipo de las enfermedades y de la pérdida de tejidos.

Sin embargo, las relaciones entre microbios y corales se alteran a medida que la temperatura del océano aumenta. Investigadores de la Universidad Estatal de Oregón han observado cómo las comunidades bacterianas de los corales estresados se vuelven inestables y ofrecen a los microbios patógenos la oportunidad de proliferar. El calentamiento del océano, en combinación con la acidificación provocada por los niveles de dióxido carbónico en aumento, también altera la calcificación de los corales, un proceso que les confiere su estructura; y puesto que la calcificación está mediada por los microbios, su alteración hace aún más difícil reparar los daños. Al mismo tiempo, los pólipos estresados expulsan las algas *Symbiodinium*, que transforman la luz solar en el alimento para los propios pólipos, que pierden así su fuente de nutrición. Como consecuencia, los corales adquieren un color blanco característico que los biólogos identifican como una condena, porque los pólipos blanqueados son también más


2

Su equipo en Brasil colocó cuatro segmentos de coral de la longitud de un dedo en cada uno de los 20 pequeños depósitos de los que disponía. También creó un cóctel de seis cepas bacterianas sanas procedentes de *Mussismilia hispida*, un coral frecuente en el Atlántico sur. Cada pocos días extraían varios segmentos, dejaban caer sobre su superficie unas gotas de probióticos y los devolvían a los tanques. A continuación, aumentaron la temperatura de la mitad de los tanques.

Unas semanas después, obtuvieron unos resultados impresionantes: más de un tercio de los corales no tratados habían muerto, pero casi todos los que habían recibido probióticos habían sobrevivido. Los análisis posteriores revelaron varios mecanismos que habían mejorado la supervivencia. En los corales tratados, diversos genes asociados a la inflamación se expresaban de forma menos intensa. También mostraban menor actividad de los genes vinculados con la muerte celular. Según Peixoto, aquello significaba que los corales podían blanquearse, pero no hasta el extremo de perder tejido. «Los probióticos les proporciona una suerte de amortiguación». Gracias a ellos, las otras técnicas de restauración podrían ver incrementadas sus posibilidades de éxito. Los probióticos adecuados, aplicados en el laboratorio antes del trasplante, podrían incrementar las probabilidades de supervivencia de los corales.

vulnerables a las enfermedades. Peixoto ha sido testigo directa de esta transformación.

UN UNIVERSO EN DESINTEGRACIÓN

Durante sus vacaciones infantiles, Peixoto hacía esnórquel en los arrecifes brasileños próximos a Bahía, fascinada por el vívido universo que se extendía bajo ella. Sus buceos una vez adulta le han permitido observar la desintegración de aquel universo. Los corales se convirtieron en esqueletos desprovistos de vida, y los pocos que sobrevivían aparecían enfermos. «Cada año es peor», afirma. «Buceas y el 90 por ciento de las especies que ves están muertas.» Peixoto decidió hacer algo radical, capaz de revivir los corales. «Queremos proteger la biodiversidad que existía en el arrecife para asegurar la supervivencia de las colonias», explica.

La experta tenía en la mente un trabajo anterior innovador. Un experimento realizado en 2010 por su equipo, destinado a desarrollar una alternativa a los peligrosos compuestos empleados para limpiar los vertidos de petróleo en los manglares brasileños, demostró que ciertas bacterias podían degradar el petróleo y promover la salud y el crecimiento de las plantas. ¿Qué sucedería si lograba suministrar suplementos bacterianos concentrados a los corales para protegerlos? Nadie lo había intentado con probióticos, pero tenía la intuición de que podía funcionar.

Como primer paso, Peixoto tomó muestras de tejido de corales locales y el agua adyacente a ellos. A continuación, secuenció los genes de las bacterias presentes para identificar especies capaces de desarrollar funciones que incrementaran la supervivencia de los corales. Cultivó los microbios locales y obtuvo mezclas de estos adaptadas a cada tipo de ambiente. Su esfuerzo se vio recompensado en 2018, cuando ella y sus colaboradores publicaron un trabajo donde demostraban que la mezcla de probióticos diseñada ex profeso ayudaba a los corales en cautividad a soportar las temperaturas elevadas y las enfermedades.

Uno de los experimentos posteriores, que se halla en revisión para su publicación, fue más allá e identificó los mecanismos por los que los probióticos podrían mejorar la salud del arrecife.

EL PRIMER ENSAYO DE CAMPO

En un fresco día de enero de 2020, científicos de la Estación Marina del Instituto Smithsoniano, en Florida, suministraron por primera vez probióticos a corales en mar abierto. El probiótico, en cuyo diseño habían invertido tres años, no era una mezcla de amplio espectro como la de Peixoto. Había sido desarrollado para combatir una amenaza específica, uno de los mayores problemas de los arrecifes de Florida: la pérdida de tejido de los corales duros. La investigadora Kelly Pitts, que se había unido al equipo en 2019 después de haber trabajado con antibióticos en la Universidad Nova Southwestern, en Florida, quería ensayar probióticos como una forma más natural de mejorar la salud de los corales. Se colocó las botellas de aire y las aletas y descendió desde un pequeño bote hacia uno de los arrecifes de franja de la costa este de Florida, frente a Fort Lauderdale. Según cuenta la investigadora, a unos nueve metros de profundidad divisó una bolsa de plástico transparente, de medio metro de ancho, que estaba clavada en el fondo y cubría un coral como si fuera una cúpula.

Dentro se hallaba un coral estrellado de más de diez años de edad (las colonias pueden prosperar durante décadas o incluso siglos). Algunos pólipos todavía conservaban un brillante color naranja, pero otros se habían descolorido al caqui, un síntoma de que podían sufrir la enfermedad de pérdida de tejido que afecta a los corales duros. Pitts introdujo un tubo flexible bajo el borde de la cúpula y conectó una jeringuilla llena de bacterias. A medida que empujaba el émbolo, un líquido turbio blanquecino rellenó la cúpula, de tal densidad que la visión del coral se oscureció.

Pitts estaba emocionada pero nerviosa. Su equipo había pasado meses ensayando los probióticos en tanques, pero estar allí fuera, en el arrecife, era completamente distinto. ¿Qué sucedería

si la mezcla salía de la bolsa? Meses después, durante otra prueba, sentiría la misma aprensión tras verter un gel probiótico, parecido a la pasta de dientes, sobre un coral del fondo marino totalmente expuesto al agua, sin bolsa alguna que lo encapsulara. Pero al ver que el gel se adhería al coral a pesar de las corrientes de agua, su nerviosismo daría paso al júbilo y reiría de alegría, aplaudiendo bajo el agua.

La enfermedad de la pérdida de tejido de los corales duros, que progresa entre los pólipos como si se tratara de ácido, ha echado a perder unas 40.000 hectáreas de arrecifes en Florida y el Caribe desde 2014. La enfermedad, supuestamente de origen bacteriano, se estaba extendiendo sin control y estaba destruyendo grandes formaciones coralinas en semanas o meses. En 2017, controlar su expansión pasó a ser una de las mayores prioridades de los conservacionistas de Florida. Gracias a la secuenciación genética, los investigadores de la Estación Marina del Instituto Smithsoniano identificaron una cepa de la bacteria *Pseudomonas*, presente en pequeñas cantidades en los corales locales, que producía un antibiótico denominado corormicina. Los ensayos realizados en acuarios demostraron su capacidad para detener la enfermedad.

Durante las pruebas de laboratorio, los investigadores aplicaron la bacteria a corales de diversos tipos de todo el arrecife, para asegurarse de que no dañaba a ninguna especie sana. Desde 2018, los investigadores de Florida, en un esfuerzo por frenar la enfermedad, habían suministrado a los corales antibióticos como la amoxicilina, una medida drástica que había matado también a multitud de bacterias beneficiosas. Pitts esperaba que los probióticos permitieran evitar ese daño indiscriminado.

A finales de 2019, el equipo del Instituto Smithsoniano consiguió los permisos para realizar ensayos en el mar. Los investigadores eran cautos y conscientes de que debían empezar a pequeña escala, pero la enfermedad se propagaba a tal velocidad que los conservacionistas locales aceptaron las pruebas.

En el ensayo de campo de enero de 2020 y en otro realizado en septiembre de 2020, Pitts y sus colaboradores trataron 14 estructuras coralinas mediante el método de la cúpula y otras siete con la pasta. Cuando el equipo realizó el primer muestreo, dos semanas después de la prueba de enero, la enfermedad se había detenido en el 80 por ciento de los corales tratados. Algunas de las lesiones repartidas por la superficie del coral habían empezado a sanar. La creciente epidemia de COVID-19, sin embargo, obligó a interrumpir los ensayos.

CONSECUENCIAS INESPERADAS

Toda la microbiología depende del contexto. Modificar la concentración de un tipo de bacteria beneficiosa para el coral puede afectar a otros componentes del microbioma de forma imprevisible. Para los escépticos en el uso de probióticos, esta complejidad e imprevisibilidad es una fuente de preocupación. «Quizá el efecto resulte positivo durante un tiempo. Pero puede cambiar fácilmente y volverse negativo», afirma Vega Thurber.

El ecólogo molecular del Instituto Hawaiano de Biología Marina, Ty Roach, que ha realizado sus propios ensayos de laboratorio con probióticos, está preocupado por los cambios irreversibles en el microbioma del coral o incluso de todo el ecosistema. «Cuanto más lo pienso, más preocupado estoy», comenta. En uno de sus estudios no publicados, introdujo 130 fragmentos del tamaño de un dedo del coral *Porites* en docenas de tanques de unos 15 litros. Algunos enfermaron y murieron después de que el equipo les inoculara una dosis de sus propias bacterias (no una mezcla creada ex profeso como la de Peixoto). El primer problema detectado por Roach fue que algunos corales producían una gruesa capa de moco en la superficie, como si estuvieran irritados. Más tarde, pequeñas partes del tejido de los pólipos murieron y las lesiones en forma de aftas se extendieron. Roach se alarmó, pero no estaba sorprendido. Las bacterias naturales del coral incluyen especies del género *Staphylococcus*, responsable de varias enfermedades en humanos.

Roach añade que existen pocos estudios publicados en revistas científicas con revisión externa que describan los mecanismos exactos por los que los probióticos protegerían a los corales. «Hemos logrado que algunos resistan algo más el calor. Pero aún no sabemos cómo lo hemos conseguido», apunta. Y se pregunta si esos tratamientos afectarán al resto de la vida marina. «Numerosos animales del arrecife interactúan con los corales», explica, entre ellos peces, algas y crustáceos. Derby Michael, biólogo acuático de la Universidad de Sweet y amigo y colaborador de Peixoto desde hace tiempo, apoya el uso de los probióticos si se demuestran seguros. Pero también se hace eco de las preocupaciones de Roach. «No quiero ser responsable de la liberación en el medio de superbacterias que a la larga puedan convertirse en la próxima enfermedad de los corales.»

Tampoco se conoce la frecuencia con la que deberían suministrarse los probióticos. En humanos, los que están indicados para resolver afecciones digestivas deben tomarse diariamente o incluso dos veces al día. Los investigadores apenas saben si una aplicación, pongamos por caso, una vez a la semana o al mes, resulta suficiente para crear un equilibrio microbiano permanente.

El riesgo es solo una de las cuestiones prácticas que hay que tener en cuenta. Ahora mismo, resulta difícil calcular el coste de suministrar cócteles a todo un arrecife. Peixoto afirma que basta una pequeña cantidad de la mezcla que ha creado para tratar grandes extensiones, pero distribuirla en un kilómetro cuadrado de arrecife podría costar entre 6000 y 7000 dólares, suponiendo que lo hicieran unos buzos experimentados (y que utilizaran sus propias embarcaciones). Una dosis podría proteger a los corales dañados por las altas temperaturas hasta un mes. Según ella, el uso de robots construidos específicamente para realizar dichos tratamientos a gran escala sería menos costoso que emplear buzos humanos.

Recientemente, Sweet estimó que cultivar coral en el laboratorio mediante evolución asistida, y luego trasplantarlo a un arrecife y monitorizar su viabilidad, costaría entre 49 y 227 dólares por colonia. Los arrecifes suelen tener decenas de miles de colonias por kilómetro cuadrado. Si las bacterias probióticas fueran añadidas a los corales antes de ser trasplantados, el coste adicional resultaría bajo, según Sweet. Pero «si tuviéramos que suministrar probióticos de forma repetida, se volvería un método caro».

Sin embargo, Roach y Sweet reconocen que la situación es tan seria que los proyectos de conservación para aplicar probióticos en el medio natural van a continuar. «Si algo hemos aprendido es que, si empezamos a perder arrecifes, la voluntad de tomar medidas drásticas se dispara», apunta Crawford Drury, biólogo marino y compañero de Roach en Hawái.

De hecho, organizaciones importantes están haciendo suya la idea. El Fondo para la Conservación de la Naturaleza (WWF) en Brasil, que financia parte de la investigación de Peixoto, es optimista sobre el uso de la técnica. En ese país, el blanqueo masivo de los corales registrado en 2019 fue el aldabonazo para explorar nuevos métodos de conservación, como el uso de probióticos, explica Vinicius Nora, analista de conservación de WWF en Brasil. La Fundación para la Gran Barrera de Coral, en Australia,

que ha invertido cientos de miles de dólares en investigación sobre probióticos, también ve el tratamiento de Peixoto como un método prometedor para fortalecer los corales criados en el laboratorio, antes de ser trasplantados. Si los próximos ensayos a pequeña escala tienen éxito, los responsables de la fundación están trabajando con ella y con científicos australianos para incluir los probióticos en futuros proyectos de restauración. «Es el momento de actuar», opina el biólogo de la organización Ove Hoegh-Guldberg. «Hemos de ponernos las botas y ensayar nuevas ideas.»

DECISIÓN EXTREMA

Peixoto comprende las preocupaciones de sus críticos. Para tranquilizar a los escépticos, incluida ella misma, está planificando realizar este año experimentos en el océano artificial de 700 metros cuadrados situado en el módulo Biosfera 2 de la Universidad de Arizona. El experimento daría una idea clara del efecto de los probióticos sobre el resto de la vida marina. De todos modos, no dedica mucho tiempo a pensar en los posibles resultados. Reconoce impacientarse con quienes reclaman cautela. Siente la obligación moral de salvar los arrecifes por todos los medios. Para ella, eso pasa por utilizar probióticos en el mar abierto a la mayor brevedad posible. «Si no hacemos algo, morirán», afirma.

Su próximo acto tendrá lugar en KAUST, asentada en un tramo de la costa saudí que penetra en el mar Rojo como la pinza de un bogavante. Desde el muelle, Peixoto puede acceder a su barca de buceo y navegar hasta un arrecife somero en 10 minutos, donde bancos de peces mariposa amarillos nadan sobre monolitos de coral de decenios de edad esparcidos sobre el fondo marino.

Al haber estado expuestos a temperaturas elevadas durante años, las bacterias locales que limitan los efectos perniciosos del calor podrían ayudar a los científicos a trasferir la resistencia a los corales de otras zonas. El arrecife «es mi refugio. Voy allí y estoy en la gloria», explica Peixoto. Pero incluso los resistentes corales del mar Rojo empiezan a mostrar signos de estrés. El blanqueo destruyó varios sectores del arrecife en 2020 y los expertos creen que lo peor está por llegar. Peixoto está ajustando una mezcla de bacterias que espera aplicar en el arrecife este año, mientras aún se desarrolla el experimento en Biosfera 2. Será la primera vez que ella y su equipo ensayan los probióticos en el océano.

Algunas formaciones coralinas del mar Rojo están separadas entre sí por extensas áreas de fondo desnudo. Esto facilita la distribución de probióticos sobre una formación mientras las adyacentes permanecen sin intervención. «Serán experimentos a pequeña escala y muy bien controlados», afirma Peixoto.

Pero incluso en este caso, las pruebas serán muy distintas de las realizadas por el equipo del Instituto Smithsoniano en Florida. Este consistió en aplicar un único microbio para tratar una enfermedad concreta del coral. Peixoto administrará a los corales un cóctel con diversas cepas con un objetivo mucho más amplio: fortalecer a los corales frente al blanqueo y al deterioro de la salud consiguiente. Tal y como hizo antes, la experta aislará microbios beneficiosos de los arrecifes locales y los combinará en una mezcla personalizada. Excluirá todos los grupos de bacterias potencialmente patógenas y, en el laboratorio de la universidad, evaluará con detalle los riesgos para asegurarse de que el cóctel no causará ningún efecto adverso sobre la salud de los corales.

Si las pruebas van bien, distribuirá su mezcla en varias formaciones arrecifales, de unos dos metros cuadrados cada una. Los microbios se liberarán mediante bandas adhesivas resistentes al agua y no permanentes, fijadas en los corales o el sedimento cercano. Se realizarán revisiones periódicas durante un año y se monitorizarán los peces y otros organismos grandes, como esponjas, en busca de efectos bacterianos indeseados.

Peixoto reconoce la magnitud de esta intervención, pero las ciudades fantasmas de coral que ve expandirse durante sus inmersiones refuerzan su compromiso con acciones radicales. Es optimista, tiene la fe de los innovadores y cree en el poder de la biorremediación. Sabe que algunos la consideran una atolondrada. Pero Peixoto y otros creen necesaria una intervención valiente, aquí y ahora. «Si desarrollamos todas estas técnicas, estamos a tiempo de salvar los arrecifes. Los corales rehabilitados pueden prosperar», sostiene. Si no reciben ayuda alguna, prevé una edad oscura para la vida submarina. IyC



RAQUEL PEIXOTO KAUST

LA CIENTÍFICA MARINA RAQUEL PEIXOTO ensaya probióticos en el laboratorio. Planea utilizar una mezcla de especies bacterianas en el mar Rojo este año para detener el blanqueo de los corales.

PARA SABER MÁS

Interspecific gamete compatibility and hybrid larval fitness in reef-building corals: Implications for coral reef restoration. Wing Yan Chan, Lesa M. Peplow y Madeleine J. H. van Oppen en *Scientific Reports*, vol. 9, artículo n.º 4757, marzo de 2019.

Marine probiotics: increasing coral resistance to bleaching through microbiome manipulation. Phillipe M. Rosado et al. en *The ISME Journal*, vol. 13, págs. 921-936, abril de 2019.

Micro-fragmentation as an effective and applied tool to restore remote reefs in the Eastern Tropical Pacific. J. J. Adolfo Tortolero-Langarica et al. en *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, artículo n.º 6574, septiembre de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Es posible salvar los corales? Rebecca Albright en *IyC*, marzo de 2019.

El método bádminton. Maria Montseny, Andrea Gori y Josep Maria Gili en *IyC*, septiembre de 2020.

EL POBLAMIENTO DE AMÉRICA



La colonización del continente americano fue mucho más compleja de lo que se pensaba. Implicó el aislamiento y la fusión de numerosas poblaciones en el curso de milenios

Jennifer Raff

Ilustración de Winona Nelson

Jennifer Raff, genetista especializada en antropología de la Universidad de Kansas, estudia el genoma humano contemporáneo y antiguo para conocer la prehistoria, en especial el poblamiento inicial de Norteamérica.



Desde que *Homo sapiens* naciera en África hace cientos de miles de años, no tardó en seguir los pasos de otras especies humanas como *Homo erectus*, los neandertales o los denisovanos, e inició una lenta expansión por el planeta. Pero los primeros humanos modernos que se adentraron en América llegaron a un lugar que ninguna familia humana había pisado antes. El proceso de exploración, poblamiento y adaptación a los ambientes que hallaron a lo largo de ambos subcontinentes fue una empresa trascendental, que constituyó el germen de las ricas y complejas historias de la gran multitud de naciones y comunidades que hoy pueblan América.

En su periplo por el continente, los antepasados de los amerindios actuales tuvieron que afrontar vicisitudes extraordinarias. Sobrevivieron al frío intenso y a la aridez de un suceso climático global ocurrido hace entre 26.000 y 20.000 años, el llamado Último Máximo Glacial. Llegaron a tierras desconocidas, habitadas por una flora y una fauna igualmente ignotas.

Tales acontecimientos se han intentado explicar desde múltiples perspectivas. Los pueblos amerindios poseen numerosas narraciones orales acerca de sus orígenes, que han transmitido de generación en generación. Ese saber tradicional contiene importantes lecciones sobre el nacimiento de la identidad común de cada pueblo y de su relación con la tierra y los demás moradores no humanos. Ciertos relatos hablan de migraciones desde lugares lejanos. El prisma que la mayoría de los científicos occidentales adopta para estudiar la historia de los movimientos demográficos es diferente. El presente artículo aborda esos modelos del poblamiento de América, pero respeta y al mismo tiempo reconoce la existencia de antiguas historias orales con las que tales modelos no siempre coinciden.

Hace tiempo que los arqueólogos, los antropólogos físicos, los lingüistas y los paleoclimatólogos intentan averiguar cómo tuvo lugar la dispersión humana por el continente americano. Fruto de esas investigaciones han elaborado hipótesis sobre el origen de los pueblos indígenas que explican quiénes fueron sus antepasados y cuándo y cómo se instalaron en aquellas tierras. La que ha prevalecido durante décadas sostiene que un único grupo de cazadores procedentes del este de Asia se internó en América después del Último Máximo Glacial siguiendo el rastro de grandes animales y, con el tiempo, dio lugar a todos los pueblos de esta parte del mundo.

Durante las últimas décadas, empero, se ha recurrido a la genética para dilucidar este capítulo de la humanidad. Y no es exagerado decir que la información aportada por los estudios genéticos ha revolucionado las ideas. Queda mucho por descubrir, pero los hallazgos genéticos, junto a descubrimientos arqueológicos recientes, han demostrado que el poblamiento de América fue mucho más complejo de lo anticipado. Ahora sabemos que los pueblos amerindios descienden de varias poblaciones antiguas, no de una sola.

ANTES DE CLOVIS

Durante gran parte del siglo xx, la teoría dominante sobre el origen de los indígenas americanos en el campo de la arqueología fue la conocida como el «consenso de Clovis». La hipótesis se basaba en la suposición de que los característicos útiles líticos de la cultura de Clovis, conocidos como puntas clovis y descubiertos en yacimientos dispersos por Norteamérica, eran el producto de los primeros paleoamericanos. Estas puntas de lanza con acanaladuras aparecieron de repente en lugares que estaban situados al sur del casquete glacial hace unos 13.000 años, durante el Pleistoceno tardío, a veces junto a restos de la megafauna contemporánea, como mastodontes, mamuts y bisontes. A partir de la cronología y la distribución geográfica de los yacimientos de la cultura de Clovis, los arqueólogos dedujeron que los humanos migraron de Siberia a Norteamérica a través del puente terrestre de Beringia, hoy sumergido, después del Último Máximo Glacial. Pronto atravesaron un corredor abierto en el tramo oriental de las Montañas Rocosas canadienses por el retroceso del casquete helado, que daba paso al interior de Norteamérica. A continuación, estos cazadores-recolectores, que vivían en grupos pequeños y recorrían grandes distancias en busca de caza mayor, viajaron rápidamente hacia el sur hasta poblar Sudamérica durante el milenio siguiente.

Con el tiempo se descubrirían yacimientos arqueológicos anteriores a los útiles de Clovis más antiguos. Uno de ellos es Monte Verde, en el sur de Chile, de 14.200 años de antigüedad. Los artefactos allí desenterrados, útiles fabricados con piedra, madera y hueso, no se parecen en nada a los de la cultura de

EN SÍNTESIS

La teoría clásica acerca del origen de los primeros americanos señala a una única población madre, procedente de Asia oriental.

Los análisis de ADN moderno y prehistórico revelan, en cambio, que hubo un cruzamiento entre dos grupos, paleoasiáticos orientales y paleosiberianos del norte.

La ramificación de aquellos primeros americanos en las poblaciones amerindias actuales dista de estar clara. Se barajan tres hipótesis, que tal vez nuevos hallazgos arqueológicos y genéticos consigan esclarecer.

Ramas ancestrales

Los genomas antiguos y contemporáneos nos han permitido conocer más pormenores acerca del origen de los pueblos amerindios. Durante mucho tiempo se pensó que una única población procedente de Asia oriental era la antecesora de todos ellos, pero los datos genéticos indican que son varias. Junto a los restos arqueológicos desenterrados en yacimientos de Beringia, estos hallazgos permiten empezar a trazar un mapa de los movimientos de las poblaciones prehistóricas a medida que penetraban en América.

A Los paleosiberianos del norte contribuyeron a la ascendencia de los pueblos originarios. Se ha recuperado ADN de ese grupo en los yacimientos de Mal'ta y Yana.

B Un subgrupo aislado de paleoasiáticos orientales constituyó el grueso de los ancestros de los pueblos originarios. Hará unos 25.000 años, estos paleoasiáticos se encontraron con los paleosiberianos del norte. Desconocemos el lugar exacto. Se han descubierto supuestos vestigios humanos en las cuevas Bluefish en el valle del Yukón, así como en los lagos E5 y Burial de Alaska, que señalan el este de Siberia como posible punto de encuentro. Otros puntos podrían estar en el centro y el norte de Beringia o en el este de Eurasia.

C La población ancestral fruto de la fusión se bifurcó hará entre 22.000 y 18.000 años. Creemos que una de las ramas se extinguió, la de los beringianos. En el yacimiento de Upward Sun River y en la cueva de Trail Creek se han hallado pruebas de su presencia en Alaska.

D La otra rama, la de los paleoamericanos, daría lugar a los pueblos originarios al sur de los casquetes Laurentino y Cordillerano.

PALEOSIBERIANOS DEL NORTE
SUBGRUPO DE PALEOASIÁTICOS DEL NORTE
HACE 36.000–25.000 AÑOS
Mal'ta
Hace 24.000 años
Glaciares
Península deTaimyr
Cuenca del Lena
Yacimiento de Yana
Hace 31.600 años
Beringia
Litoral antiguo
Litoral moderno
Lago Burial
Hace 34.000–32.000 años
Lago E5
Hace 34.000–32.000 años
Cuevas Trail Creek
Hace 9000 años
Cuevas Bluefish
Hace 24.035–23.310 años
BERINGIANOS
Upward Sun River
Hace 11.500 años
PALEOAMERICANOS
Glaciares

Clovis. Son la prueba de que un milenio antes de que esta apareciese en Norteamérica, otros pueblos se habían abierto paso hasta el remoto extremo sur del continente.

Gracias a la revolución que transformó la biología molecular a finales del pasado siglo, los científicos han podido recurrir a estrategias nuevas, como la recuperación de ADN antiguo, para despejar las incógnitas que envuelven a los primeros pobladores del continente americano. Desde entonces ha sido posible secuenciar y analizar el ADN mitocondrial (de herencia materna) y el cromosoma Y (de herencia paterna) de individuos pertenecientes a poblaciones indígenas contemporáneas y antiguas. Y a partir de esos datos genéticos se ha podido estimar la cronología de los principales acontecimientos demográficos. Aparecieron así las líneas generales de la historia del poblamiento de América: la llegada de los antepasados remotos provenientes de Asia, el período de aislamiento de los predecesores de los pueblos indígenas durante el pico del Último Máximo Glacial, seguido de una rápida expansión demográfica milenios antes de Clovis y Monte Verde. Pero se trataba de un simple esbozo, basado en un par de segmentos de genoma. El genoma íntegro brinda mucha más información sobre los antepasados de una persona que el ADN mitocondrial o el cromosoma Y.

Hoy ya es relativamente sencillo secuenciar el genoma de una persona viva. El de algunos indígenas contemporáneos pone de manifiesto una variación genética atribuible al contacto con los europeos a partir de 1492. Los tramos del genoma heredados de los pueblos precolombinos nos cuentan historias que se remontan decenas de miles de años en la prehistoria.

Recuperar el genoma de los restos de esos ancestros no es nada fácil. La mayoría del ADN que se extrae de un hueso o un diente antiguo pertenece a microbios del suelo, plantas, animales y humanos contemporáneos; los fragmentos de ADN antiguo son escasos y están dañados. Pero los últimos avances han permitido recuperar y analizar ADN de fuentes muy mal

DANIEL P. HUFFMAN (*mapa*)

conservadas. Tales progresos han engrosado la cantidad de genomas prehistóricos, y los modernos métodos de análisis nos han ayudado a entender mejor las historias que atesoran. Juntos, los genomas contemporáneos y antiguos brindan una imagen más detallada sobre los antepasados de los pueblos originarios que la que aporta la información contenida en las mitocondrias y los cromosomas Y, desvelando la cuna de las diversas ramas de antepasados y el momento de su encuentro.

UNA CONVERGENCIA ANTIGUA

Señalar un momento concreto como el «origen» de «un pueblo» es algo tan arbitrario y simplista que raya lo absurdo. A lo largo del tiempo, las poblaciones humanas han estado compuestas por personas con complejas mezclas de diferentes ancestros, cada uno de ellos con su propia historia. Pero hemos de iniciar esta historia genética en algún punto, así que lo haremos en el Paleolítico superior. Hace unos 36.000 años, un grupo que vivía en la actual Asia oriental se quedó aislado gradualmente de los demás pobladores de la región. En un proceso muy lento en el que siguieron intercambiando parejas con su población madre durante más de 11.000 años, acabaron por distinguirse genéticamente de los antepasados de los asiáticos orientales modernos, hará de eso unos 25.000 años. Ese grupo aislado de paleoasiáticos orientales fue el principal antecesor de los pueblos originarios de América.

Todos los estudios genómicos descartan la posibilidad de que los pueblos precolombinos se mezclaran con europeos, africanos o cualquier otra población antes de 1492

Otra rama ancestral surgió hace unos 39.000 años y habitó en la región donde está ubicado el yacimiento de Yana, en el nordeste de Siberia, hará unos 31.600 años. Esta zona se enclava en el oeste de Beringia, nombre que recibe la región que abarca Siberia oriental, Alaska occidental y el puente de tierra que antaño las unía y que ahora se halla sumergido en el estrecho de Bering. Dos dientes de leche encontrados en Yana nos han brindado información valiosísima sobre esta población, a la que los genetistas denominan paleosiberianos del norte. Estos paleosiberianos de Yana eran cazadores-recolectores que vivían en latitudes elevadas todo el año. Los dientes pertenecían a dos niños que los perdieron entre los 10 y 12 años, reemplazados por los molares y los caninos permanentes. Demuestran que habían sobrevivido a los peligros de la infancia. Los genomas obtenidos de las piezas dentales, estudiados en 2019 por Martin Sikora, de la Universidad de Copenhague, y sus colaboradores, muestran que sus antiguos propietarios no eran parientes cercanos y que pertenecían a una población considerable, compuesta por medio millar de adultos. A diferencia de los neandertales, cuyos genomas indican que formaban poblaciones pequeñas y sufrían extinciones locales periódicas, al parecer los paleosiberianos del norte consiguieron prosperar en entornos realmente inhóspitos.

Estos se extendieron por el norte y el centro de Siberia. Los restos de un niño que vivió en el yacimiento de Mal'ta prueban su presencia en la zona central y sur de Siberia hace 24.000 años, durante el Paleolítico superior. El ADN recuperado de sus restos revela que fueron antepasados de muchas poblaciones separadas geográficamente, entre ellas los euroasiáticos occidentales actuales (grupo que engloba los europeos) y los pueblos originarios de América.

Las dos ramas principales que componen la ascendencia de los pueblos originarios, los paleoasiáticos orientales y los paleosiberianos del norte, convergieron y se cruzaron hace entre 25.000 y 20.000 años. La población resultante se formó poco después del inicio del Último Máximo Glacial, período durante el cual Siberia estuvo sometida a un clima gélido que dificultó la supervivencia de la flora y la fauna. Debió ser muy difícil, si no imposible, vivir en ese entorno, y, de hecho, en el nordeste de Siberia no se han hallado restos arqueológicos datables en el intervalo entre 29.000 y 15.000 años. Numerosos arqueólogos deducen de esta ausencia que buscaron refugio en regiones más clementes. No sabemos con exactitud qué ocurrió, pero es probable que el encuentro de grupos de paleoasiáticos orientales y paleosiberianos del norte fuera consecuencia de la migración desde Siberia como respuesta a ese cambio ambiental. La pregunta es: ¿dónde se encontraron?

Es probable que sus caminos no se cruzaran en Beringia occidental: parece ser que la región quedó deshabitada después de hace unos 29.000 años. Esto nos deja Eurasia oriental, Beringia central u oriental y Beringia noroccidental como posibles puntos de encuentro. La genética no resuelve fácilmente esta incógnita geográfica. Los genomas de los pueblos amerindios indican que sus antepasados permanecieron aislados varios milenios durante el Último Máximo Glacial, desde poco después de que los paleoasiáticos orientales y los paleosiberianos del norte se entremezclaran. Este aislamiento descarta con gran probabilidad que el encuentro tuviese lugar en Eurasia oriental, donde la proximidad de otros grupos casi con toda seguridad habría devenido en una mezcla adicional, pues tal es la inclinación humana. Aun así, algunos arqueólogos aducen que Eurasia oriental es la única región en que se han hallado pruebas extensas y claras de la presencia humana en este período frío.

Es posible que, en cambio, los antepasados de los amerindios soportaran el Último Máximo Glacial en la costa sur del entonces centro de Beringia. Las reconstrucciones paleoambientales indican que debió gozar de un clima suave, merced a la proximidad de las corrientes oceánicas, cubierta posiblemente por una suerte de humedal. En una época en que el casquete polar alcanzaba su extensión máxima, debió de ser relativamente acogedora para personas y animales por igual. El gran inconveniente es que el centro de Beringia está hoy sumergido bajo el mar, así que no es posible buscar pruebas de ocupación. Con todo, sí existen indicios intrigantes de presencia humana en Beringia oriental. Los yacimientos del territorio del Yukón y de la vertiente norte de Alaska contienen rastros de esa presunta presencia durante el Último Máximo Glacial: no bastan para convencer a la mayoría de arqueólogos, pero obligan a prestar atención a la región.

En fechas recientes se ha señalado a la región ártica siberiana, situada por encima de los 66 grados de latitud al norte y al oeste de Beringia occidental, como otro posible refugio durante el Último Máximo Glacial y, por lo tanto, posible punto de encuentro entre los paleoasiáticos orientales y los paleosiberianos del norte. Hoy, buena parte de la zona permanece sumergida, pero a lo largo del Último Máximo pudo ser una vasta estepa que mantenía grandes manadas de mamuts, rinocerontes lanudos, bisontes y caballos. Debió de ser un entorno realmente complicado para

vivir, pero gracias a las pruebas arqueológicas y genéticas encontradas en Yana, sabemos que los pobladores humanos estaban bien adaptados a las condiciones árticas mucho antes del inicio del Último Máximo. Con todo, a semejanza de lo que ocurre con los demás refugios potenciales, aparte de Eurasia oriental, contamos con muy pocas pruebas arqueológicas directas de la presencia humana en este confín del mundo.

Si bien no sabemos con exactitud dónde se encontraron los paleosiberianos del norte y los paleoasiáticos orientales, la genética permite deducir qué debió ocurrir a continuación. Inmediatamente después de que ambos grupos intercambiaran sus genes mientras permanecían aislados de los demás, se produjeron una serie de sucesos demográficos complejos muy cercanos en el tiempo que acabarían dando lugar a los pueblos amerindios y siberianos. Aquella población ancestral se dividió en al menos dos ramas hará entre 22.000 y 18.100 años. Una, la conocida como beringianos, no posee descendientes vivos. La otra, la de los paleoamericanos, dio lugar a los pueblos originarios de América al sur de los casquetes glaciares Laurentino y Cordillerano.

Lo más probable es que la rama de los amerindios ancestrales se dividiese a su vez durante el Último Máximo Glacial. De uno de esos subgrupos, al que nos referimos como Población No Muestreada A, no se han encontrado restos arqueológicos que la definan, pero los mixes, oriundos de Oaxaca (México), parecen poseer una parte de su ADN.

Una pequeña proporción de los pobladores actuales del Amazonas parece tener también antepasados de un grupo relacionado con los australasianos, llamado Población Y. Este vínculo es uno de los hallazgos más desconcertantes de los últimos años relacionados con la ascendencia de estos grupos. También han aparecido rastros de esta señal genética en un individuo de 40.000 años de antigüedad hallado en la cueva de Tianyuan, en China. Así pues, hasta ahora las pruebas sugieren que existió un grupo antiguo extendido por toda Asia que en última instancia dio lugar a los pueblos contemporáneos del Pacífico y a algunas poblaciones amazónicas. Los investigadores siguen intentando determinar cuántos pueblos antiguos y actuales poseen esta ascendencia y dónde vivía la población madre. Más importante aún es que todos los estudios genómicos descartan la posibilidad de que los pueblos precolombinos se mezclaran con europeos, africanos o cualquier otra población antes de 1492. Esta conclusión difiere de ciertos relatos divulgados en series de televisión que hablan de una migración transatlántica; todas las pruebas genéticas y arqueológicas invalidan rotundamente tal hipótesis.

HACIA EL SUR

Después del Último Máximo Glacial, los paleoamericanos se desplazaron hacia el sur y se dividieron en al menos tres ramas. La primera está representada por un único genoma de una mujer que vivió en la meseta del Fraser, en la Columbia Británica, hace unos 5.600 años. Sabemos muy poco más de esta población. Las otras dos abarcan toda la diversidad genética de las poblaciones que se situaron al sur de los casquetes de hielo. La rama de los paleoamericanos del norte incluye a los antepasados de los pueblos algonquinos, na-dené, salish y tsimshian. La rama del sur engloba a los antepasados de pueblos esparcidos por Sudamérica, Centroamérica y buena parte de Norteamérica. (Los pueblos del Ártico poseen una ascendencia adicional, producto de migraciones posteriores.) Los arqueólogos no se ponen de acuerdo sobre el momento, el lugar y el modo en que se dispersaron por los subcontinentes. A día de hoy, contamos con tres situaciones hipotéticas.

Los más conservadores abogan por la que es, en esencia, una versión actualizada de la teoría del consenso de Clovis. A su juicio, la clave para entender el poblamiento de América radica en el yacimiento de Swan Point, en Alaska central. Datado en unos 14.100 años, es el más antiguo de Beringia oriental, y su tecnología lítica mostraría una clara relación con la cultura siberiana Diuktai y con los útiles norteamericanos de la cultura de Clovis. Estos arqueólogos defienden que los ancestros de los pueblos originarios residieron en el nordeste de Asia o Siberia durante el Último Máximo Glacial y no migraron por Beringia hacia Alaska hasta hace entre 16.000 y 14.000 años. Sostienen que Clovis es el primer asentamiento estable en América y que aquellos paleoamericanos atravesaron el corredor deshelado que los glaciares en regresión dejaron abierto, posiblemente seguidos más tarde por otras olas migratorias desde Siberia. Esta teoría considera inválidos los yacimientos anteriores a Clovis o los atribuye a humanos que no dejaron ninguna impronta cultural o biológica en las futuras poblaciones indígenas.

Otros arqueólogos recalcan la importancia de las pruebas anteriores a Clovis, como las halladas en lugares muy alejados de Alaska central, como es el yacimiento de Page-Ladson, en el norte de Florida. Descrito en 2016 por Jessi Halligan, de la Universidad Estatal de Florida, y sus colaboradores, el yacimiento contiene artefactos de piedra, entre ellos un cuchillo roto encontrado junto a huesos de mastodonte de 14.450 años. Page-Ladson es determinante para estos investigadores por lo insignificante que debió ser en su época: un pequeño abrevadero natural situado a gran distancia de la costa actual, sin ningún rasgo distintivo que lo hiciera destacar en el paisaje. Allí se descuartizó un mastodonte y quedaron abandonados algunos huesos, uno de los colmillos y el cuchillo roto. Queda claro que la visita fue breve y con un propósito concreto; no hay señales de que los artífices permanecieran un tiempo allí, fabricaran útiles o llevasen a cabo otras actividades. Este alto breve y deliberado sugiere que se adaptaron al medio lo suficiente como para sentirse cómodos con este lugar desconocido y con la perspectiva de encontrar comida y colmillos como materia prima.

Conocer la geografía de un lugar y los recursos que este ofrece, como las charcas que atraen a la fauna, lleva su tiempo; es lo que los arqueólogos llaman proceso de asentamiento. Para algunos, Page-Ladson es una prueba clara de que el hombre se asentó allí al menos hace 14.450 años, lo que significa que podría haber llegado mucho antes a América. ¿Pero cuánto?

A lo largo del continente hay una serie de yacimientos enclavados muy por debajo del límite meridional de los casquetes continentales, cuya antigüedad se sitúa entre los 14.000 y 16.000 años. Para explicar su presencia necesitamos un paradigma diametralmente distinto del propuesto por el poblamiento hipotético descrito con anterioridad. Por una razón concreta, su antigüedad limita los itinerarios factibles para llegar al continente. El corredor deshelado situado entre los casquetes Laurentino y Cordillerano no se abrió hasta hace 14.000 años, como mínimo. Si los humanos se asentaron hace 14.450 años, tal vez antes, parece harto improbable que hubieran podido tomar esa ruta. Además, el ADN ambiental encontrado en los testigos de sedimentos lacustres del centro del corredor indica que no debió de estar poblado por plantas y animales hasta hace unos 12.600 años, mucho después de la llegada de los humanos. Y la prueba arqueológica directa más antigua de nuestra presencia en la región del corredor data de hace 12.400 años. Teniendo en cuenta todos los factores, las pruebas apuntan a que los primeros habitantes de América no utilizaron el corredor sin hielo.

Hipótesis de la dispersión

Los expertos discrepan en cuanto al momento, el lugar y el modo de dispersión de los antepasados de los pueblos amerindios. El debate gira en torno a tres grandes modelos.

1.ª hipótesis: Poblamiento reciente

Algunos arqueólogos sostienen que los artífices de las distintivas puntas de lanza descubiertas por primera vez en Clovis (Nuevo México) y más tarde en otros lugares, como Anzick (Montana), pertenecían a las primeras poblaciones estables del continente. En el yacimiento de Swan Point, en Alaska, reside una de las claves de la teoría, porque alberga útiles líticos que parecen vincular la antigua cultura Diuktai de Siberia con la cultura Clovis en Norteamérica. Los partidarios de esta teoría, conocida como la del consenso de Clovis, sostienen que los primeros habitantes se adentraron en el continente mucho después del Último Máximo Glaciar y descendieron a través del corredor deshelado abierto por el retroceso de los glaciares. Creen que los yacimientos anteriores a Clovis no son válidos o no guardan relación con los pueblos originarios contemporáneos.



2.ª hipótesis: Poblamiento antiguo desde la costa

Otros arqueólogos conceden gran importancia a los yacimientos anteriores a Clovis, pues argumentan que son una prueba de que la presencia humana en América precede con mucho a la tecnología de Clovis y a la apertura del corredor sin hielo. Consideran probable el viaje a bordo de pequeñas embarcaciones a lo largo de la costa occidental, desde hace unos 17.000 años o incluso entre 20.000 y 30.000 años, si damos por ciertas las controvertidas afirmaciones sobre indicios de actividad humana en Pedra Furada (Brasil) y en la cueva del Chiquihuite (México).



3.ª hipótesis: Poblamiento muy antiguo

Una minoría de estudiosos creen que el hombre llegó mucho antes a América. Ponen como ejemplo el yacimiento de mastodontes de Cerutti, donde se conservan huesos de estos herbívoros con marcas de despiece y útiles líticos de hace 130.000 años. Si se confirma que los restos son fruto de la actividad humana, constituirían una prueba de que los primeros humanos que llegaron a este confín del mundo seguramente fueron *Homo erectus*, no *H. sapiens*. La mayoría de los especialistas descartan tal posibilidad.



MAPAS DE DANIEL P. HUFFMAN, ILUSTRACIÓN DE JEN CHRISTIANSEN (*artefactos*)

El itinerario alternativo más probable fue por mar, a bordo de pequeñas embarcaciones que resiguieron la costa occidental, que pudo haber sido accesible hará entre 17.000 y 16.000 años. La ruta costera también encaja mejor con los datos genéticos sobre la expansión de los amerindios del sur. Las teorías sobre la historia del poblamiento que cuentan con más apoyos señalan que dichos paleoamericanos se diversificaron con rapidez dando lugar a poblaciones regionales a lo largo de América del Norte, Central y del Sur hará entre 17.000 y 13.000 años. El itinerario marítimo explicaría mejor la velocidad y la cronología de estas divisiones de la población que el terrestre, más lento.

Una variante de este hipotético primer poblamiento costero admite que el hombre habría podido estar presente en América durante o incluso poco antes del Último Máximo Glacial, puede que hace entre 20.000 y 30.000 años. En varios yacimientos de México y Sudamérica, entre ellos Pedra Furada, en el nordeste de Brasil, se han encontrado presuntos indicios de una presencia anterior a ese máximo. Pero la mayoría de la comunidad arqueológica se muestra escéptica con esos hallazgos, pues pone en duda la precisión de la datación y que los supuestos artefactos fuesen modelados por manos humanas y no por procesos naturales.

Ese escepticismo no descarta la presencia humana en América antes del Último Máximo Glacial, simplemente demanda más pruebas para confirmarla. De haber pobladores en América durante o poco antes de esa época, debieron ser poco numerosos, por lo que habrían dejado muy pocas huellas arqueológicas. Esta presencia pionera tal vez explicaría los desconcertantes indicios de la presencia de la Población Y en la ascendencia de algunos grupos amazónicos: podría ser el fruto de la mezcla entre quienes se dispersaron por el continente tras la retirada del casquete de hielo y los que ya estaban instalados en Sudamérica.

La tercera hipótesis es radicalmente distinta. Un pequeño colectivo de especialistas cree que la llegada del hombre a esta parte del mundo tuvo lugar en fechas antiquísimas. La teoría se basa en gran medida en los restos óseos de 130.000 años de antigüedad extraídos del yacimiento de mastodontes de Cerutti, en California. En un análisis publicado en 2017, Steve Holen, del Museo de Historia Natural de San Diego, y sus colaboradores llegaron a la conclusión de que las marcas observables en los huesos de mastodonte eran consecuencia del despiece. A su juicio, las piedras halladas en el yacimiento eran útiles manufacturados. Se cree que *H. sapiens* no comenzó a migrar fuera de África en cantidades importantes hasta, tal vez, hace entre 70.000 y 80.000 años. Si los restos de Cerutti son realmente de factura humana, significaría no solo que el género humano llegó a América mucho antes de lo imaginado, sino que los primeros habitantes del continente fueron probablemente *H. erectus* y no *H. sapiens*.

La mayoría de los arqueólogos rechaza ese argumento por muchas razones, como la posibilidad de que la causa de las marcas no fueran manos prehistóricas, sino la maquinaria moderna, ya que los restos óseos se descubrieron durante la construcción de una carretera. Además, los patrones de variación observados en el genoma de los indígenas contemporáneos no indican que la descendencia de los pueblos originarios de América difiera notablemente de la de otros humanos, ni revelan una mezcla entre los *H. sapiens* anatómicamente modernos y otra clase de humanos en América. Si *H. erectus* llegó a este rincón del planeta, no dejó fósiles ni un vestigio genético en los pueblos originarios.

Tal y como están las cosas en 2021, la mayoría de arqueólogos y genetistas coincide en que los primeros pobladores de América llegaron hace entre 14.000 y 15.000 años, pero discrepan sobre qué yacimientos preclovis son válidos y, por lo tanto, sobre cómo se adentraron en ambos subcontinentes. Esta diversidad de opiniones refleja lo difícil que es trabajar en paralelo con registros arqueológicos y genéticos, ambos con grandes lagunas. De las tres hipótesis descritas, la segunda es la más cercana a conciliar la arqueología y la genética. Pero ni siquiera ese modelo reconcilia todos los datos disponibles.

ACEPTAR LA INCERTIDUMBRE

Cabe esperar que las cosas se compliquen más aún conforme ahondemos en la cuestión del poblamiento de América. En el momento en que escribo estas líneas, tal vez haya varias docenas de genomas completos de individuos de pueblos indígenas contemporáneos y prehistóricos disponibles para su consulta pública. Estos genomas están distribuidos de forma desigual; la mayoría procede de América Central y del Sur, así como de las partes más septentrionales de Norteamérica. Hay pocos genomas enteros de los actuales Estados Unidos, a causa de la justificada desconfianza de los pueblos indígenas. Ese recelo es consecuencia de los abusos perpetrados por médicos y antropólogos que, en los primeros días de la antropología, profanaron los restos de sus antepasados en los lugares de reposo. Con muchos de ellos se plantearon clasificaciones raciales que con el tiempo quedaron desacreditadas. Es importante que los genetistas colaboren con las comunidades indígenas para que la búsqueda de conocimientos genéticos no derive en perjuicios semejantes.

Esa laguna geográfica en los estudios de la variación genética nos sumerge en un período dinámico de investigación en este campo. Cada nuevo genoma secuenciado aumenta enormemente nuestro conocimiento del tema. También se buscan pistas en fuentes alternativas de ADN, como son las bacterias y los virus asociados a los restos humanos, además de las presas y los animales de compañía. Ese ADN no humano contribuye a aclarar los movimientos de las poblaciones humanas, sin vulnerar las creencias sagradas de los indígenas respecto a los difuntos.

Es muy probable que salgan a la luz datos que modifiquen los modelos expuestos. Este artículo es un marco que servirá para comprender la importancia de esos descubrimientos futuros. Quienes trabajamos en este campo hemos aprendido a tolerar la ambigüedad y a aceptar la provisionalidad de los modelos, siempre sujetos a revisión a la luz de las nuevas pruebas. Con los modernos análisis del ADN y la información que arrojarán, el futuro luce apasionante para el estudio de los primeros americanos y de su triunfo en la última etapa de la milenaria marcha de la humanidad a través del globo.

PARA SABER MÁS

Pre-Clovis occupation 14,550 years ago at the Page-Ladson site, Florida, and the peopling of the Americas. Jessi J. Halligan et al. en *Science Advances*, vol. 2, 13 de mayo de 2016.

A 130,000-year-old archaeological site in southern California, USA. Stephen R. Holen, et al. en *Nature*, n.º 544, págs. 479-483, abril de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Paleoamericanos y amerindios. Primeros pobladores de América. R. González, M. Hernández y S. Van der Molen en *IyC*, septiembre de 2004.

Los primeros americanos. Heather Pringle en *IyC*, enero de 2012.

¿Cuándo se pobló América? Ruth Gruhn en *IyC*, noviembre de 2020.

COSMOLOGÍA

UN NUEVO ATLAS DEL UNIVERSO

Un mapa de millones de galaxias ha permitido reconstruir 11.000 millones de años de historia cósmica

Kyle Dawson y Will Percival

Ilustración de Mark Ross Studios



Kyle Dawson es profesor de física y astronomía en la Universidad de Utah. Fue investigador principal del Sondeo Espectroscópico Extendido de Oscilaciones Bariónicas (eBOSS) y es coportavoz del futuro Instrumento Espectroscópico para la Energía Oscura (DESI).

Will Percival es director del Centro de Astrofísica de Waterloo, en Ontario, y miembro asociado del Instituto Perimeter de Física Teórica. Fue científico del sondeo de eBOSS y es coordinador científico de la futura misión espacial Euclid.



COMO ESCRIBIÓ DOUGLAS ADAMS EN SU *GUÍA DEL AUTOESTOPISTA GALÁCTICO*, «El espacio es grande. Muy grande. Usted simplemente se negará a creer lo enorme, lo inmensa, lo pasmosamente grande que es». Muchos astrónomos hemos dedicado nuestra carrera a crear mapas del universo a las mayores escalas posibles, con el objetivo de descubrir cuán grande es en realidad el cosmos y cómo funciona.

Tales mapas resultan clave para estudiar la física que gobierna la historia del universo. En julio de 2020, tras veinte años de observaciones, el Sondeo Digital del Cielo Sloan publicó un mapa que incluye millones de galaxias. Este comprende nuestro entorno inmediato, los confines más remotos del universo conocido y todo lo que hay en el medio.

Dicho mapa tridimensional indica las posiciones de cuatro millones de galaxias repartidas a lo largo de miles de millones de años luz, algunas de las cuales se remontan a las épocas más tempranas del cosmos.

El mapa muestra que las galaxias no están distribuidas al azar. Antes bien, se agrupan en estructuras: largos filamentos y láminas bidimensionales de galaxias en algunas regiones, y oscuros vacíos con pocas galaxias en otras. Creemos que el germen de esas estructuras comenzó a formarse antes que las propias galaxias, cuando aún no habían pasado mil millones de años desde la gran explosión. Y al cartografiar la mayor parte de la historia cósmica, podemos registrar el crecimiento de dichas estructuras y deducir las leyes fundamentales que guiaron su evolución. Este nuevo atlas aporta información esencial para entender algunos de los mayores misterios de la física; entre ellos, la geometría del universo y la naturaleza de la energía oscura, el agente responsable de la expansión acelerada del espacio.

NÚCLEOS Y CÁSCARAS ESFÉRICAS

El Sondeo Digital del Cielo Sloan emplea el telescopio de la Fundación Sloan, situado en el Observatorio de Apache Point, en Nuevo México. Una parte del proyecto fue el Sondeo Espectroscópico Extendido de Oscilaciones Bariónicas (eBOSS) y su predecesor, BOSS. Estos estudios basaron sus mediciones en las llamadas «oscilaciones acústicas bariónicas», una impronta muy particular que se observa en la distribución espacial de las galaxias.

Para entender esa huella, debemos considerar la evolución del universo durante sus primeros 400.000 años. Se cree que, una fracción de segundo después de la gran explosión, el cosmos experimentó un periodo de rápida expansión conocido como inflación. Durante esta fase, el espacio creció tan deprisa que las escalas subatómicas alcanzaron el tamaño de una pelota de golf en tan solo 10^{-32} segundos. Las minúsculas fluctuaciones cuánticas en la distribución de energía del universo adquirieron así un tamaño macroscópico. Las regiones con mayor densidad

EN SÍNTESIS

El Sondeo Espectroscópico Extendido de Oscilaciones Bariónicas (eBOSS) ha publicado un detallado mapa de millones de galaxias. Algunas se encuentran tan lejos que se ven tal y como eran en los albores del cosmos.

El atlas incluye las posiciones y velocidades de millones de galaxias a lo largo casi todas las épocas cósmicas. Gracias a ello, los investigadores han podido reconstruir con detalle la historia de expansión del universo.

El nuevo mapa ha aportado pistas clave para estudiar la energía oscura y la validez del modelo cosmológico estándar, así como para analizar varias discrepancias entre algunas observaciones recientes y las predicciones de dicho modelo.

de energía fueron atrayendo más y más materia, mientras que otras fueron quedando vacías. Durante los 13.700 millones de años siguientes, las regiones más densas dieron lugar a los filamentos, las láminas y los cúmulos de galaxias que vemos en la actualidad. Los astrónomos se refieren a este proceso como «crecimiento de estructuras».

La impronta de las oscilaciones acústicas bariónicas surgió debido a la interacción entre la luz y la materia y al modo en que eso afectó a la formación de estructuras. El universo contiene dos tipos de materia: una que interacciona con la luz (la materia ordinaria que forma parte de nuestro día a día, también llamada «bariónica») y otra que no lo hace. Esta última se conoce como materia oscura. En el caliente y denso universo primigenio, las partículas de materia ordinaria y las de luz (los fotones) colisionaban entre sí tan a menudo que, básicamente, permanecían ligadas unas a otras. Sin embargo, la materia oscura podía moverse de forma independiente. Y mientras que la gravedad hacía que la materia oscura se acumulara en el centro de las regiones más densas, la presión de la luz arrastraba la materia ordinaria hacia fuera.

La materia ordinaria y la luz dejaron de interaccionar unos 400.000 años después de la gran explosión, cuando el universo se hubo expandido y enfriado tanto que las partículas se diseminaran y los fotones comenzaran a moverse con libertad. Esa «liberación» primigenia de luz puede verse hoy en el firmamento: es lo que conocemos como fondo cósmico de microondas. Una vez que la luz y la materia dejaron de estar vinculadas, quedó un exceso de materia ordinaria distribuida en cáscaras esféricas alrededor de las acumulaciones de materia oscura. Después la gravedad atrajo tanto materia normal como materia oscura a esas estructuras. Sin embargo, el proceso dejó una impronta en la distribución de materia del universo: núcleos especialmente densos rodeados por capas esféricas. Esa huella de las oscilaciones acústicas bariónicas tiene un tamaño característico denominado «horizonte de sonido comóvil», el cual puede verse en nuestro mapa de galaxias.

Un aspecto clave es que esa impronta puede usarse a modo de «regla estándar»: una herramienta que nos permite medir distancias cósmicas. Dado que esas huellas se crearon casi a la vez y de manera idéntica, todas ellas tienen el mismo tamaño: cada núcleo está separado unos 500 años luz de la cáscara esférica que lo rodea. No obstante, cuando vemos estas estructuras en el cielo, aparecen más pequeñas o más grandes dependiendo de lo lejos que se encuentren. Por tanto, si medimos su tamaño aparente y lo comparamos con su tamaño intrínseco, el cual conocemos, podemos determinar su distancia a la Tierra.

SEPARAR LA LUZ

Los cálculos basados en una regla estándar nos permiten medir la distancia media a un conjunto de galaxias, pero por sí mismos no aportan información cosmológica. Para obtenerla, necesitamos datos adicionales sobre la velocidad a la que esas galaxias se alejan de nosotros debido a la expansión cósmica. Además de captar imágenes profundas de un tercio del cielo, el sondeo Sloan estudió dos millones de galaxias y cuásares (galaxias lejanas dominadas por un brillante agujero negro supermasivo central) mediante espectroscopía, una técnica que permite separar las longitudes de onda de la luz procedente de un objeto. Esas mediciones espectrales revelan cuán rápido se alejan las galaxias de nosotros, lo cual depende de cuánto se haya expandido el universo desde el momento en que se emitió la luz hasta el instante en que la observamos. Dado que dicha expansión estira las longitudes de onda, la luz se vuelve más rojiza, un efecto conocido como desplazamiento al rojo.

Cada observación de BOSS y eBOSS registraba los espectros luminosos de mil objetos a la vez, para lo cual empleaba un cable de fibra óptica específico para cada uno de ellos. Un extremo de cada cable estaba unido a una placa de aluminio situada en el plano focal del telescopio. Para cada noche de observación, los investigadores preparaban ocho de esas placas en cartuchos especialmente construidos para la ocasión, lo que requería conectar a mano las fibras en los mil agujeros que tachonaban las placas. Dos técnicos tardaban una media hora en acondicionar una sola placa. El mes más productivo de la historia del sondeo Sloan fue marzo de 2012, cuando observamos 103.000 espectros.

Las galaxias que queríamos estudiar eran seleccionadas a partir de imágenes previas obtenidas por telescopios de todo el mundo. Los técnicos perforaban orificios en las placas de aluminio usando una máquina controlada por ordenador alojada en la Universidad de Washington. Y lo hacían de tal modo que, cuando el telescopio apuntaba a una región concreta del cielo para llevar a cabo su exposición, de una hora de duración, el extremo de cada fibra coincidía a la perfección con el centro de una galaxia o un cuásar de interés.

Entre diciembre de 2009 y marzo de 2019, cada noche en que la luna no era demasiado brillante, el telescopio examinaba una parte del cielo y las fibras enviaban la luz que incidía sobre el plano focal a dos espectrógrafos. Esas modernas cámaras detectoras medían digitalmente la intensidad de la luz en función de su longitud de onda. Gracias a esos datos, podíamos calcular el desplazamiento al rojo de cada galaxia.

Durante los casi diez años en los que eBOSS y su predecesor BOSS tomaron datos, medimos la posición y el desplazamiento al rojo de más de cuatro millones de galaxias. Dado que la luz de las galaxias lejanas ha tardado muchísimo tiempo en llegar a la Tierra, los mapas de BOSS y eBOSS corresponden a 11.000 millones de años de tiempo cósmico, por lo que abarcan la mayor parte de la historia del universo.

EXPLORAR LA ENERGÍA OSCURA

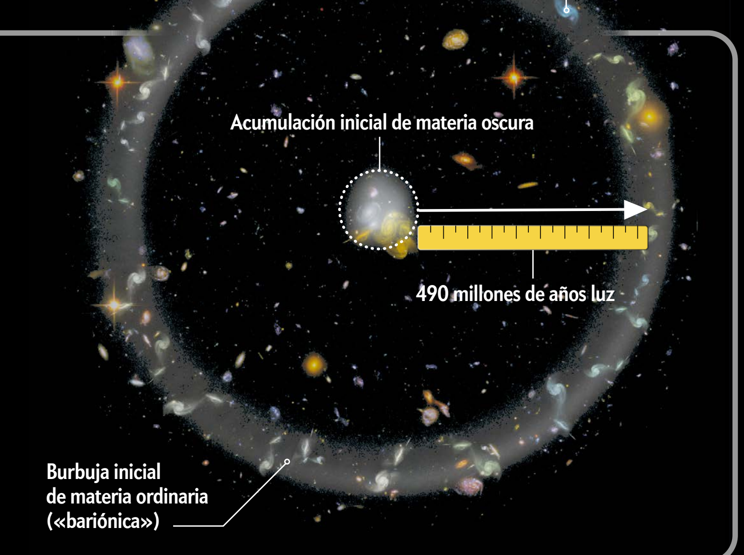
Al combinar nuestras mediciones del desplazamiento al rojo con nuestros cálculos de distancias basados en la regla estándar que proporcionan las oscilaciones acústicas bariónicas, logramos dilucidar la relación entre ambas variables; es decir, cuánto se ha estirado la longitud de onda de la luz debido a la expansión del universo en función de la distancia recorrida. Esa información nos muestra cómo ha cambiado la expansión del espacio a lo largo de los últimos 11.000 millones de años y nos da pistas sobre uno de los mayores enigmas de la física actual: la energía oscura.

La energía oscura es el misterioso agente que parece estar acelerando la expansión del universo, un fenómeno sorprendente descubierto en 1998. El modelo matemático más sencillo para explicarla se basa en la llamada constante cosmológica: un término presente en las ecuaciones de la relatividad general de Einstein que puede interpretarse como la energía contenida en el espacio vacío. Esa energía actúa como una fuerza repulsiva que se opone a la atracción de la gravedad y acelera la expansión cósmica. En los últimos veinte años, este modelo cosmológico, conocido como Lambda-CDM (donde lambda es el nombre de la letra griega usualmente empleada para designar la constante cosmológica, y CDM son las siglas inglesas de «materia oscura

Continúa en la página 40

Reconstruir la expansión del universo

La energía oscura es el misterioso agente que causa que el cosmos se expanda cada vez más deprisa. Para estudiarla, el Sondeo Digital del Cielo Sloan ha estado tomando datos durante dos décadas a fin de confeccionar un mapa de millones de galaxias y analizar cómo ha cambiado el ritmo de expansión del universo a lo largo de la historia cósmica. El mapa final ha sido publicado por el Sondeo Espectroscópico Extendido de Oscilaciones Bariónicas (eBOSS), una parte del proyecto Sloan llevada a cabo entre 2014 y 2019.



1 IDENTIFICAR UNA HUELLA CÓSMICA

El sondeo eBOSS ha estudiado las «oscilaciones acústicas bariónicas», un patrón estadístico observado en la distribución de las galaxias de todo el cosmos. Esta impronta se remonta a las diminutas fluctuaciones de energía que tuvieron lugar justo después de la gran explosión. Debido a la forma en que interaccionaban la luz y la materia en el universo temprano, dichas fluctuaciones produjeron acumulaciones de materia oscura rodeadas por cáscaras esféricas de luz y materia ordinaria. Más tarde, las galaxias fueron formándose preferentemente allí donde había más materia. Como resultado, las galaxias del universo actual presentan una distribución estadística en núcleos y cáscaras esféricas con un radio fijo de unos 500 millones de años luz.

2 USAR LA HUELLA A MODO DE REGLA

El tamaño aparente de esas huellas en la distribución de galaxias dependerá de la distancia a la que se encuentren: aquellas muy lejanas darán lugar a cáscaras esféricas que se verán más pequeñas, mientras que las más cercanas parecerán mayores. Sin embargo, todas esas esferas presentan un radio de unos 500 millones de años luz. Por tanto, comparar su tamaño aparente con su tamaño real permite deducir la distancia a la que se hallan. De esta manera, las oscilaciones acústicas bariónicas proporcionan una «regla universal» para medir distancias cósmicas.

3 MEDIR LA VELOCIDAD DE LAS GALAXIAS

El siguiente paso consiste en medir la velocidad a la que se alejan las galaxias como consecuencia de la expansión del universo. En general, la luz de una galaxia distante parecerá tanto más rojiza cuanto más rápido se esté alejando el objeto, un fenómeno estrechamente relacionado con el efecto Doppler. Como consecuencia, analizar el espectro de una galaxia (el «color» de la luz que recibimos de ella) permite determinar a qué velocidad se separa de nosotros.

Telescopio Sloan

Desplazamientos al rojo de las galaxias

Tierra

Telescopio

Longitud de onda de la luz

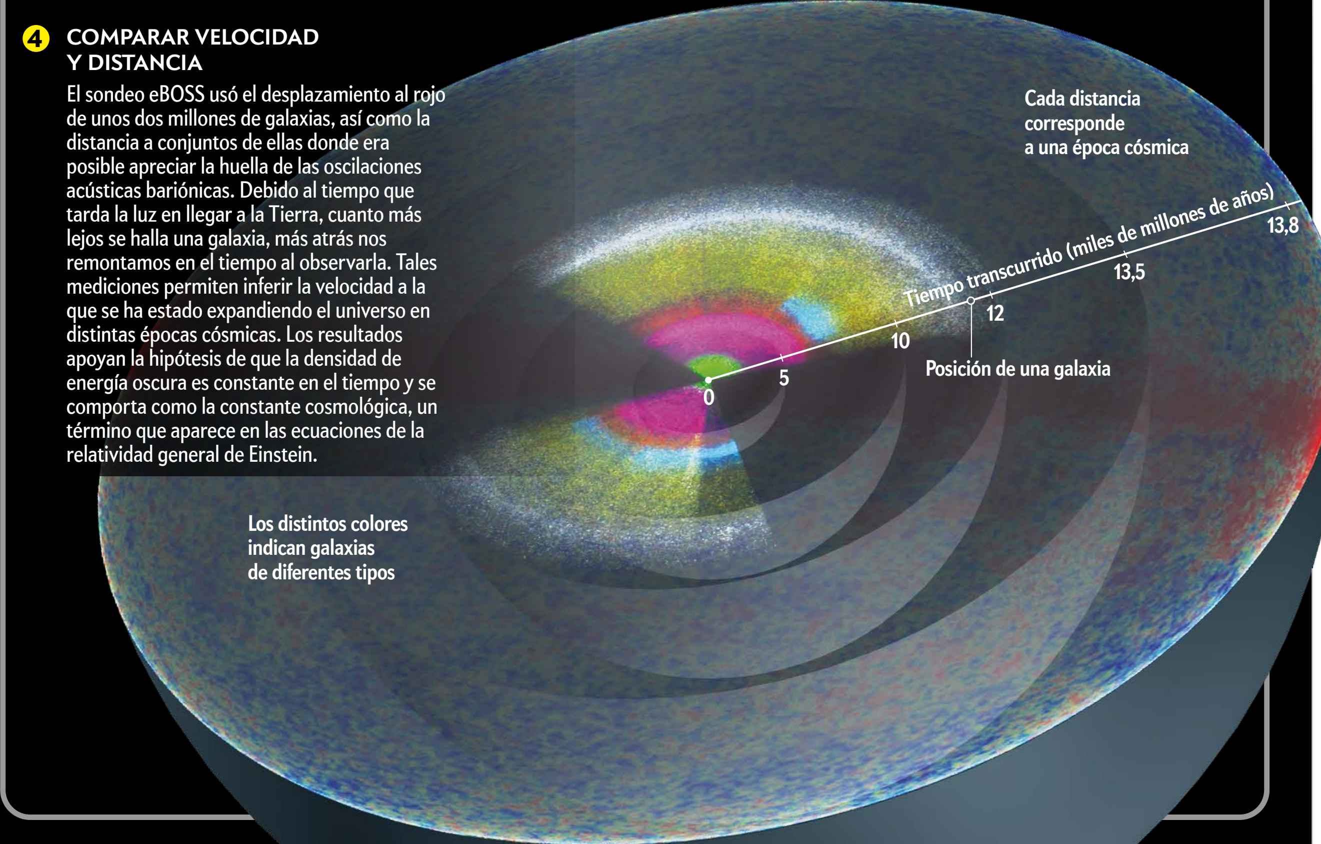
Referencia

Objeto que se aleja despacio

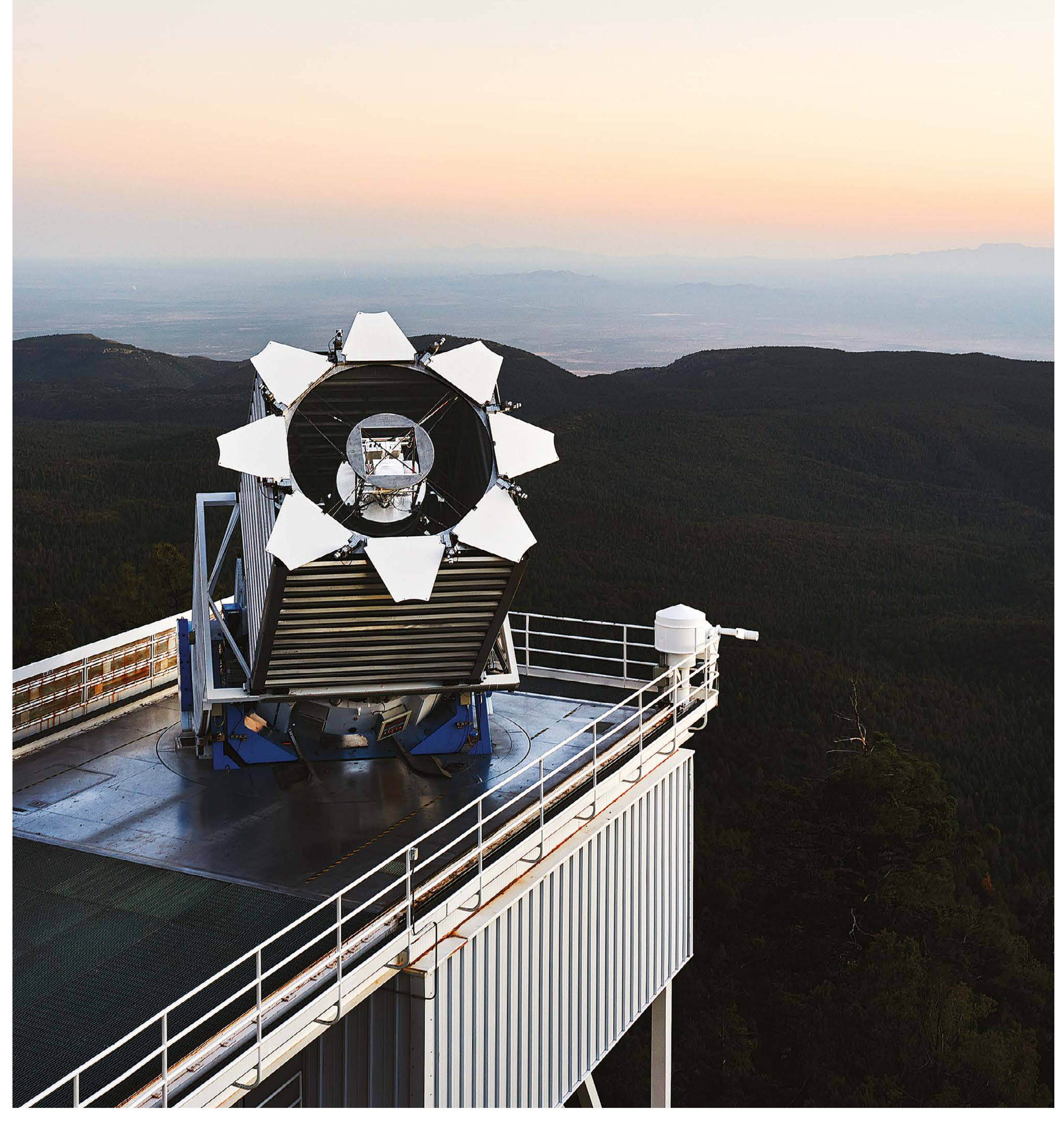
Objeto que se aleja deprisa

4 COMPARAR VELOCIDAD Y DISTANCIA

El sondeo eBOSS usó el desplazamiento al rojo de unos dos millones de galaxias, así como la distancia a conjuntos de ellas donde era posible apreciar la huella de las oscilaciones acústicas bariónicas. Debido al tiempo que tarda la luz en llegar a la Tierra, cuanto más lejos se halla una galaxia, más atrás nos remontamos en el tiempo al observarla. Tales mediciones permiten inferir la velocidad a la que se ha estado expandiendo el universo en distintas épocas cósmicas. Los resultados apoyan la hipótesis de que la densidad de energía oscura es constante en el tiempo y se comporta como la constante cosmológica, un término que aparece en las ecuaciones de la relatividad general de Einstein.



GEORGE RETSECK (*ilustraciones*); ANAND RAICHOOR, INSTITUTO FEDERAL SUIZO DE TECNOLOGÍA DE LAUSANA/LABORATORIO NACIONAL LAWRENCE BERKELEY (*mapas en el paso 4*)



ENRICO SACCHETTI, SCIENCE SOURCE

EN EL AÑO 2000, el telescopio de 2,5 metros de la Fundación Sloan, en Nuevo México, inició un cartografiado de galaxias que se prolongaría durante dos décadas.

Viene de la página 37

fría»), ha superado numerosas pruebas. Y aunque no lo entendemos del todo, hoy por hoy constituye el mejor modelo del que disponemos.

En los últimos años, sin embargo, tres observaciones recientes han insinuado discrepancias entre el modelo Lambda-CDM y los datos. En primer lugar, las mediciones de la tasa de expansión cósmica en el universo cercano no coinciden con las predicciones que hace el modelo Lambda-CDM a partir de los datos del universo distante. Segundo, ciertos análisis de las propiedades del fondo cósmico de microondas sugieren que el espacio podría estar más curvado de lo que pronostica la teoría de la inflación cósmica. Por último, la distorsión de la luz de las galaxias lejanas por parte de la materia que se interpone en su camino parece más débil de lo que prevé el modelo Lambda-CDM. El tiempo dirá si estos desacuerdos constituyen los primeros signos de que necesitamos un nuevo modelo cosmológico, o si no reflejan más que problemas en las técnicas de medida. En todo caso, los resultados de eBOSS nos están ayudando a avanzar en la dirección correcta.

Nuestras observaciones muestran, por ejemplo, que el universo experimentó una transición cuando tenía el 60 por ciento de su tamaño actual. En ese momento, la expansión del espacio dejó de ralentizarse y comenzó a acelerarse. Tal hallazgo concuerda con las predicciones del modelo Lambda-CDM, que indica que fue entonces cuando la energía oscura se impuso al efecto gravitatorio de la materia, el cual tiende a frenar la expansión.

Otro ingrediente crucial del modelo Lambda-CDM es la curvatura del espacio. La teoría de la inflación cósmica predice un universo con una geometría espacial muy aproximadamente plana. Sin embargo, algunos estudios del fondo cósmico de microondas han sugerido que el espacio estaría curvado. Gracias

a los mapas de eBOSS, hemos logrado mejorar la precisión de las medidas de la geometría espacial en un factor de 10 con respecto a las observaciones previas. No vemos pruebas de que el espacio esté curvado, lo que respalda la teoría inflacionaria.

También pudimos evaluar varios modelos cosmológicos estudiando cuán rápido se formaron las estructuras; es decir, los cúmulos y los filamentos de galaxias. Los desplazamientos al rojo que muestra el sondeo reflejan la velocidad relativa de las galaxias con respecto a nosotros, los observadores, pero no la causa de dicho movimiento. La mayor parte de ese desplazamiento al rojo se debe a la expansión del cosmos (el hecho de que todos los objetos del espacio se están alejando unos de otros), pero a él también contribuye el crecimiento de las estructuras. A medida que las galaxias se agrupan en cúmulos y se apartan de los vacíos, sus velocidades cambian y, en consecuencia, también lo hace su desplazamiento al rojo.

Las velocidades que se ven afectadas por la formación de estructuras se ponen de manifiesto cuando comparamos lo que se observa a lo largo y ancho de la línea de visión de las galaxias. Y a partir de ellas, podemos inferir el ritmo al que crecen las estructuras. Gracias a los datos de eBOSS y a los de sondeos previos, logramos calcular ese ritmo de crecimiento con una precisión cercana al 3,5 por ciento. Nuestro resultado coincide con las predicciones de la relatividad general, lo cual es importante ya que varias mediciones anteriores basadas en diversos métodos habían arrojado valores en torno a un 10 por ciento menores.

En general, nuestras mediciones no aportan pruebas de que el modelo cosmológico estándar con constante cosmológica sea erróneo. No vemos sorpresas en el crecimiento de estructuras, en las propiedades de la energía oscura ni en la geometría del espacio. Sin embargo, sí que hallamos la misma discrepancia mencionada antes entre el ritmo de expansión del espacio cuando este se calcula a partir de datos del universo cercano y a partir del fondo cósmico de microondas. Las observaciones de este último arrojan una tasa de expansión de 67,28 ± 0,61 kilómetros por segundo y por megapársec (km/s/Mpc). Sin embargo, las mediciones basadas en el universo cercano implican valores un 10 por ciento mayores. A partir de nuestras determinaciones de las oscilaciones acústicas bariónicas, calculamos una tasa de expansión de unos 67 km/s/Mpc, tanto si combinamos nuestros datos con los del fondo cósmico de microondas como si no lo hacemos. La diferencia entre este valor y el que obtienen los astrónomos cuando se limitan a estudiar el universo cercano se está volviendo lo bastante significativa como para poner en cuestión algunos supuestos del modelo cosmológico estándar. Es posible que exista un problema con una o más de las mediciones que intervienen en los cálculos, pero es al menos igual de probable que tengamos que revisar el modelo de la expansión temprana del universo y el horizonte de sonido comóvil. Quizá sea necesario introducir un nuevo tipo de partícula, campo o interacción para explicar esta discrepancia.

SONDEOS FUTUROS

En los últimos veinte años, el telescopio y los espectrógrafos del sondeo Sloan han liderado los esfuerzos mundiales para estudiar el desplazamiento al rojo de las galaxias, los cuales culminaron con eBOSS. La colaboración Sloan continuará elaborando nuevos mapas de estrellas y cuásares, y nuestro éxito ha llevado a planificar sondeos de galaxias aún mayores y que cubran un intervalo más amplio de la historia cósmica. Uno de esos proyectos, que ya ha iniciado las primeras operaciones científicas, es el Instrumento Espectroscópico para la Energía Oscura (DESI). Dicho estudio empleará un espectrógrafo multiobjeto de 5000 fibras situado en el telescopio Mayall del Observatorio Nacional de Kitt Peak, en Arizona, para trazar un mapa aún más profundo y detallado del universo. Este nuevo espectrógrafo es capaz de observar 5000 objetos a la vez y se halla instalado en un telescopio cuyo espejo primario casi dobla en diámetro al de la Fundación Sloan. Esta vez, en vez de depender de seres humanos, serán robots especializados los que coloquen en su lugar cada una de las 5000 fibras. En cinco años, DESI creará un catálogo de galaxias más de diez veces mayor que el del sondeo Sloan.

La misión por satélite Euclid, dirigida por la Agencia Espacial Europea y cuyo lanzamiento está previsto para 2022, también llevará a cabo un amplio estudio del desplazamiento al rojo de las galaxias. Dado que tomará sus datos desde el espacio, libre de las distorsiones causadas por la atmósfera terrestre, Euclid observará mayores desplazamientos al rojo (es decir, mayores distancias) que los que podemos apreciar con claridad desde tierra. La misión medirá los desplazamientos al rojo de unos 25 millones de galaxias. Además de DESI y Euclid, ya hay planes en marcha para construir espectrógrafos multiobjeto aún mayores en telescopios de unos 10 metros. Sin duda, todo ello conducirá a avances notables en nuestra comprensión del universo. IyC

PARA SABER MÁS

Planck evidence for a closed Universe and a possible crisis for cosmology. Eleonora Di Valentino, Alessandro Melchiorri y Joseph Silk en *Nature Astronomy*, vol. 4, págs. 196-203, noviembre de 2020.

KiDS-1000 cosmology: Cosmic shear constraints and comparison between two point statistics. Marika Asgari et al. en *Astronomy & Astrophysics*, vol. 645, art. A104, enero de 2021.

Completed SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Cosmological implications from two decades of spectroscopic surveys at the Apache Point Observatory. Colaboración eBOSS en *Physical Review D*, vol. 103, art. 083533, abril de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

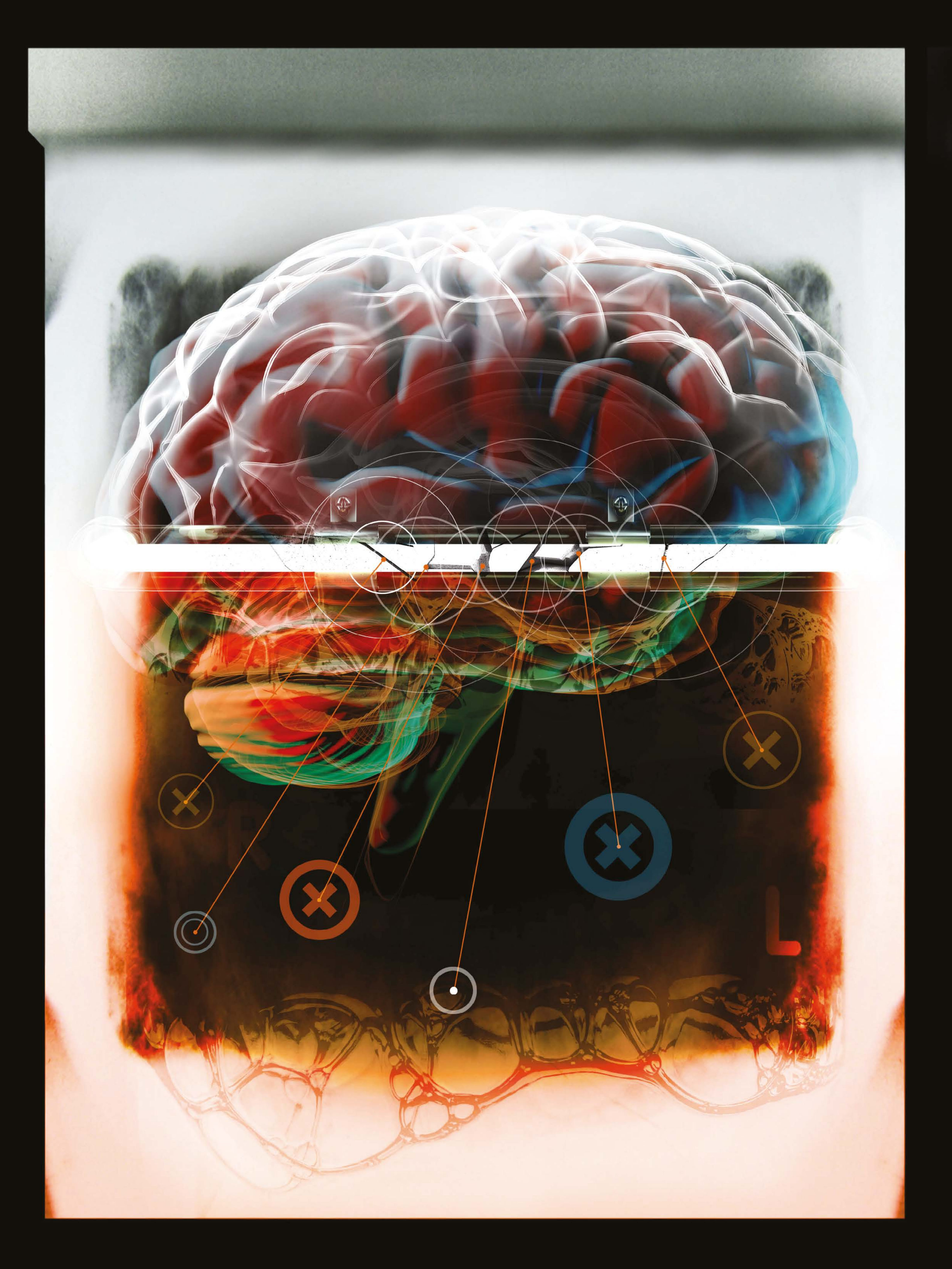
El Sondeo de la Energía Oscura. Joshua Frieman en *IyC*, enero de 2016.

Nueva luz sobre el cosmos oscuro. Eusebio Sánchez, Ramon Miquel y Juan García-Bellido en *IyC*, enero de 2018.

La crisis en torno a la constante de Hubble. Richard Panek en *IyC*, mayo de 2020.

El mayor mapa tridimensional del universo. Andreu Font-Ribera, Héctor Gil-Marín y Santiago Ávila en *IyC*, enero de 2021.

El problema de la constante cosmológica. Clara Moskowitz en *IyC*, abril de 2021.


L

NEUROCIENCIA

FILTRACIONES EN LA BARRERA CEREBRAL

Los daños en la barrera hematoencefálica pueden provocar alzhéimer y otras demencias. Al restaurar su función protectora en animales viejos, el cerebro se recupera y rejuvenece

Daniela Kaufer y Alon Friedman

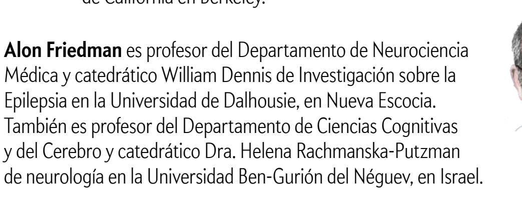
EN SÍNTESIS

La barrera hematoencefálica es una red de vasos sanguíneos que ofrece protección al encéfalo al evitar la entrada en él de sustancias nocivas y patógenos.

Cada vez más pruebas indican que los defectos en esta coraza protectora están relacionados con el envejecimiento y varias enfermedades neurológicas, como el alzhéimer.

Se están ensayando estrategias y tratamientos para reducir las filtraciones en la barrera y evitar la cadena de sucesos moleculares que llevan a la alteración de la comunicación entre neuronas y al deterioro cognitivo.

VIKTOR KOEN



Daniela Kaufer es profesora del Departamento de Biología Integral, investigadora del Instituto de Neurociencias Helen Wills y decana adjunta de ciencias biológicas en la Universidad de California en Berkeley.

Alon Friedman es profesor del Departamento de Neurociencia Médica y catedrático William Dennis de Investigación sobre la Epilepsia en la Universidad de Dalhousie, en Nueva Escocia. También es profesor del Departamento de Ciencias Cognitivas y del Cerebro y catedrático Dra. Helena Rachmanska-Putzman de neurología en la Universidad Ben-Gurión del Néguev, en Israel.



En mitad de la noche, observábamos nadar a los ratones. Corría el año 1994 y nos hallábamos en el laboratorio de la Universidad Hebrea, en Jerusalén, los dos en cuclillas junto a una piscina de agua fría. La sala estaba helada y nos dolía la espalda de tanto encorvarla. Llevábamos repitiendo esta rutina muchas noches y nos sentíamos cansados e incómodos, igual que los ratones. Estos roedores odian nadar, sobre todo en agua fría, pero queríamos estresarlos.

Hacíamos el turno de noche porque los dos teníamos otras ocupaciones por el día. (Kaufer cursaba su doctorado en neurobiología molecular, y Friedman era médico de las Fuerzas Armadas israelíes y a menudo estaba de guardia.) Lo que nos reunía todas las noches con los ratones era el afán de comprender una incógnita médica: el síndrome de la guerra del Golfo. Al término del conflicto en 1991, aparecieron cada vez más casos de soldados de la coalición liderada por Estados Unidos que padecían fatiga crónica, dolor muscular, problemas para dormir y deterioro cognitivo, y su tasa de hospitalización era mayor que la de los veteranos no movilizados. Algunos médicos sospechaban que estos trastornos se debían a la presencia en el cerebro de piridostigmina, un fármaco que se había suministrado a los soldados para protegerlos de las armas químicas.

No obstante, esa teoría se enfrentaba a una gran objeción: se suponía que la piridostigmina no podía pasar del torrente circulatorio al cerebro. Los vasos sanguíneos que atraviesan este órgano vital cuentan con paredes formadas por células especializadas, estrechamente unidas entre sí y con la facultad de controlar lo que entra y sale. Constituyen un escudo eficaz que mantiene las toxinas, los patógenos (como las bacterias) y la mayoría de los medicamentos dentro de los vasos. Esta estructura se llama barrera hematoencefálica (BHE) y el fármaco no debería haber podido atravesarla.

Salvo, claro está, que la barrera estuviera alterada. Nos preguntábamos si la tensión física y psicológica del combate habría provocado de algún modo fugas en el escudo. Los ratones nadadores nos ayudarían a comprobar si el estrés causaba daños. Al término de la sesión de natación, los sacábamos de la piscina y les inyectábamos en vena un colorante azul. Esperábamos a que el tinte recorriera el cuerpo, volviéndolo progresivamente azul. Con una BHE indemne, el cerebro mantendría su color blanco rosado normal. Sacrificábamos a los animales para examinar el encéfalo con el microscopio de disección. A lo largo de varias noches, habíamos probado distintas duraciones de la sesión de natación, sin que observáramos cambio alguno.

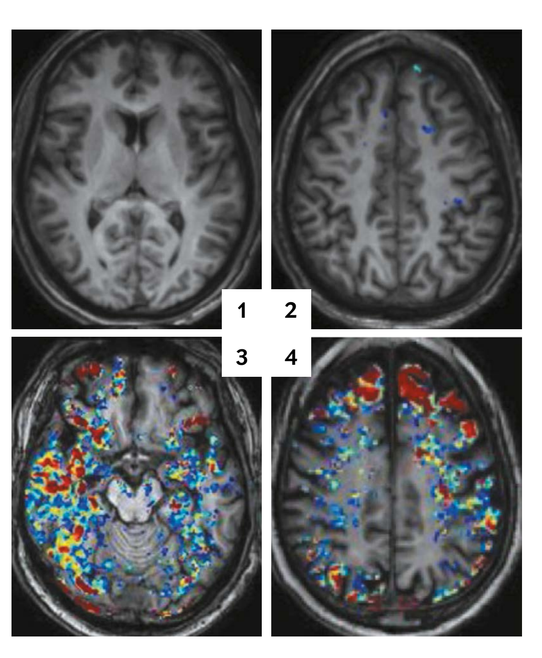
Pero esa noche, tras dos inmersiones en agua un poco más fría, se produjo la transformación: ¡los cerebros mostraban un intenso tono azul! El trabajo de laboratorio es a menudo tedioso y el éxito suele ser sutil, pero esta vez dábamos saltos de alegría y nos abrazábamos llenos de emoción. Nuestro extraño experimento había funcionado. Las situaciones estresantes pueden originar fugas en la BHE. Con nuestra mentora, la neurocientífica Hermona Soreq, procedimos a demostrar que tales cambios permitían la entrada de piridostigmina y alteraban la actividad de las células cerebrales. Publicamos los resultados en 1996 en *Nature Medicine* y en 1998 en *Nature*.

Un cuarto de siglo después, podemos afirmar que el descubrimiento resultó decisivo para nuestras carreras, así como el comienzo de una amistad y una colaboración científica para toda la vida. El hallazgo del tinte azul revelador fue el primer paso en un camino que, durante muchos años, nos llevó a estudiar cada vez con mayor profundidad la relación entre otras enfermedades del cerebro y los defectos en la coraza protectora del órgano. Hoy en día, la entrada en él de la piridostigmina constituye una importante hipótesis causal para explicar el síndrome de la guerra del Golfo (aunque existen también otros posibles fármacos). Y nuestras investigaciones han asociado el daño de la BHE, causado por el envejecimiento o las lesiones, además del estrés agudo, a varias enfermedades más conocidas: alzhéimer y demencias afines, epilepsia y lesión encefálica traumática. En dos artículos publicados en 2019 en *Science Translational Medicine*, demostramos que, a medida que las personas envejecen, el escudo va perdiendo integridad y se producen filtraciones por las que se introducen proteínas sanguíneas que en condiciones normales no lo harían. Estas proteínas, a su vez, activan una cascada de acontecimientos en las células encefálicas de los que resultan algunos de los cambios más destacados que acompañan con frecuencia al envejecimiento y la enfermedad: inflamación, actividad neuronal anómala y deterioro cognitivo.

La relación entre la causa y el efecto es particularmente intensa, ya que al detener las reacciones desencadenadas por estas

fugas revierten los signos de enfermedad, por lo menos en los roedores. En los ratones viejos, logramos eliminar la «niebla» inflamatoria, bien con un fármaco selectivo que protege a las células cerebrales de la irritación causada por las proteínas sanguíneas, o bien mediante modificaciones genéticas que impiden a estas células liberar moléculas inflamatorias. A los pocos días del tratamiento, su cerebro comenzó a actuar como el de los ratones jóvenes. La actividad eléctrica anómala disminuyó, y los marcadores de inflamación descendieron. Al introducirlos en laberintos, los animales se abrieron paso con la rapidez y precisión de los jóvenes. Por razones éticas, no es posible ensayar estas modificaciones cerebrales en humanos. Sin embargo, gracias a las técnicas de diagnóstico por la imagen, hemos comparado cerebros de personas con alzhéimer y sanas. Las imágenes muestran filtraciones progresivamente crecientes de la BHE en las personas afectadas, así como otras características de la cascada desatada por la enfermedad.

Aún no sabemos si el daño de la barrera es en realidad responsable del alzhéimer u otras enfermedades neurológicas. Podría ser un factor contribuyente junto con otras causas, como la genética y diversos fallos celulares que se han observado con el envejecimiento. O podría tratarse de un daño colateral. Y los experimentos en ratones a menudo no son trasladables a los humanos. Pero en este momento, la teoría dominante desde hace tiempo sobre el alzhéimer (que propone que lo desencadena una acumulación de la proteína amiloide beta en el cerebro) parece menos convincente que nunca. Numerosos experimentos han reducido los niveles encefálicos de esta proteína sin que mejorara la enfermedad o el deterioro mental de las personas. Los medicamentos que actúan sobre el amiloide beta no han dado resultado. Ante los 50 millones de personas que padecen hoy demencia en todo el mundo y los 10 millones más que se diagnostican cada año, según la Organización Mundial de la Salud, muchos abogan por considerar otras explicaciones. Una de las vías que vale la pena explorar es si los defectos en el escudo protector del cerebro desatan una cadena de sucesos que desemboca en la enfermedad. Según los experimentos, es posible bloquear dicha cadena para restaurar la salud del órgano.



LA BARRERA CON LA EDAD: Las imágenes cerebrales, en las que se destaca en color una molécula trazadora en sangre, muestran más fugas en la barrera hematoencefálica a medida que las personas envejecen. A los 30 años, no hay marcador (*1*). A los 42, las manchas azules indican pequeñas filtraciones (*2*). A los 65, las manchas rojas y amarillas reflejan flujos mayores (*3*). A los 76, el patrón continúa (*4*).

ALON FRIEDMAN Y DANIELA KAUFER

DEFECTOS EN EL MURO

La palabra *barrera* da a entender que la BHE es un muro que rodea el encéfalo, pero en realidad se parece más a un filtro extendido. Al centro de control de nuestro organismo llega entre el 15 y el 20 por ciento de la sangre oxigenada que bombea el corazón, a través de una compleja red de vasos sanguíneos. Estos son diferentes de los demás vasos del cuerpo, y presentan paredes celulares compactas y sistemas de transporte molecular específicos que forman un filtro semipermeable. Las redes neuronales precisan para su funcionamiento un entorno cuidadosamente controlado, de modo que el filtro permite el paso de moléculas como el oxígeno y la glucosa, pero bloquea a las proteínas de la sangre, ciertos iones, las células del sistema inmunitario y los patógenos. Esta malla protectora se extiende por la mayoría de las regiones del cerebro, desde las capas externas de la corteza, donde tiene lugar la actividad cognitiva superior, hasta lugares profundos como el hipocampo, que regula el almacenamiento de la memoria. Así pues, los fallos del filtro pueden provocar todo tipo de problemas neurológicos.

En la década de 1990, cuando llevábamos a cabo nuestro trabajo inicial sobre el síndrome de la guerra del Golfo, sabíamos que otros investigadores habían observado daños de la BHE en ciertos trastornos neurológicos, como el alzhéimer. Pero ignorábamos si esta anomalía era una causa o un efecto, cómo aparecían las filtraciones en el escudo y de qué manera alteraban el funcionamiento encefálico. Sin embargo, queríamos averiguarlo.

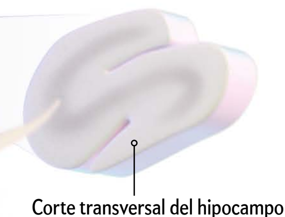
Después de nuestra labor en Jerusalén, Kaufer desarrolló su beca posdoctoral en la Universidad Stanford, y Friedman continuó su formación médica en Israel, especializándose en neurocirugía. Aun así, el tiempo y la distancia no nos distanciaron. Durante las vacaciones con nuestras respectivas familias, navegando entre las islas griegas, nos poníamos al día. En Stanford, Kaufer continuaba investigando cómo afectaba el estrés al cerebro de los ratones. Friedman, en su propia consulta, reafirmaba las primeras observaciones de otros científicos que habían detectado alteraciones de la BHE en muchos pacientes con afecciones neurológicas muy diversas. ¿Qué hacía exactamente la barrera dañada?

Empezamos a dilucidar la respuesta a esta pregunta a mediados de la década de 2000, cuando tuvimos la oportunidad de trabajar en Berlín con el ya desaparecido neurocientífico Uwe Heinemann, del Instituto de Neurofisiología, una parte del Centro Charité de Medicina Básica. Heinemann nos brindó su laboratorio para nuestro siguiente experimento clave. Queríamos observar el funcionamiento cerebral justo después de que comenzara a alterarse la BHE. Para ello, administramos a las ratas una sustancia que, en esencia, perforaba la barrera, y luego diseccionamos el cerebro. Mantuvimos vivos los cortes del órgano en líquido nutritivo y registramos con un electrodo las señales eléctricas con que las células se comunicaban entre sí.

Los primeros días fueron aburridos. Las neuronas emitían señales, una tras otra, separadas, en patrones irregulares, comunicándose como si no hubiera pasado nada fuera de lo común. Cuando estábamos a punto de abandonar, el quinto día, las pautas de esta comunicación se alteró. Cada vez más neuronas comenzaron a emitir señales a la vez, de forma sincronizada. Al cabo de una semana, las estimulamos con una pequeña señal del electrodo, imitando un breve mensaje eléctrico en la corteza

Cuidado con las filtraciones

En el cerebro, las paredes de los vasos sanguíneos están formadas por células estrechamente unidas que forman un filtro protector llamado barrera hematoencefálica (BHE). Esta permite que los nutrientes esenciales pasen de la sangre a las células del órgano, pero bloquea la entrada de los patógenos y ciertas proteínas hemáticas que resultan lesivas para las delicadas neuronas. Investigaciones recientes indican que con el envejecimiento van apareciendo fugas en la barrera. En las regiones de la memoria, como el hipocampo, estos fallos inician una cascada de acontecimientos dañinos que pueden derivar en la enfermedad de Alzheimer y otras demencias.



Deterioro con la edad

Con el envejecimiento, las uniones de la BHE se debilitan y las células dejan pasar sustancias que en condiciones normales detendrían. Una de ellas es la albúmina. Esta proteína se fija a un receptor de los astrocitos y activa una señal molecular llamada factor de crecimiento transformante beta (TGFβ). Como consecuencia, se pone en marcha una cadena de eventos que conducen a inflamación, daño neuronal y deterioro cognitivo importante.

Barrera sana

En el cerebro joven y sin enfermedades, la BHE funciona bien y permite el paso de las moléculas necesarias, como el oxígeno y la glucosa. Estas sustancias nutren a las neuronas y a unas células especializadas, llamadas astrocitos, que dan soporte a las conexiones neuronales y facilitan la transmisión de señales.

Astrocito

Neurona

Unión estrecha

Glóbulo rojo

Albúmina

Unión débil

1 La albúmina se une a los receptores de TGFβ en la superficie de los astrocitos.

2 El TGFβ y otras señales activan unas sustancias llamadas citocinas y unas células llamadas microglía, que generan inflamación y daño neuronal.

Receptor de TGFβ

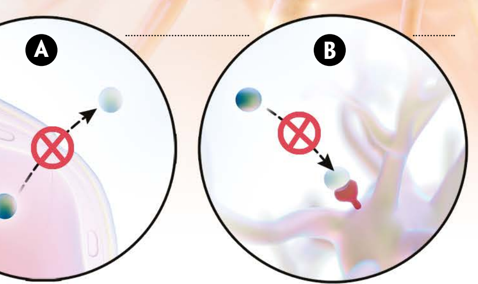
Citocinas

Microglía activada

3 Este proceso también altera las señales eléctricas entre las neuronas, y los patrones anómalos pueden acelerar su muerte.

Evitar las filtraciones

Dado que la albúmina que atraviesa la barrera parece iniciar una secuencia que desemboca en enfermedad, el interés de los científicos se centra en detener esa cascada. Un planteamiento sería tapar las primeras brechas que se abren en el escudo, pero aún no se ha logrado demostrar ninguna forma efectiva de hacerlo **A**. Los investigadores han interrumpido la secuencia más adelante, cuando la albúmina entra en contacto con los astrocitos. En los ratones, un fármaco experimental llamado IPW bloquea los receptores de TGFβ en esas células, por lo que la albúmina no puede adherirse **B**. También se han creado animales modificados genéticamente cuyos astrocitos no producen estos receptores. Con ambos métodos, el cerebro envejecido y dañado de los roedores recuperó su aspecto sano.



NOW MEDICAL STUDIOS

cerebral. El estímulo disparó una tormenta de células activadas a la vez, semejante a lo que se observa en las personas y animales con epilepsia.

Lo sucedido con estas células es parecido a la formación de una tormenta en Twitter. Supongamos que creamos hoy una cuenta en esa red social y tuiteamos un mensaje extraordinario. Seguramente la respuesta sería muy pequeña porque no tendríamos muchos seguidores. En cambio, si en los próximos días generamos una red de seguidores mayor y volvemos a tuitear el mismo mensaje, es probable que sea reenviado, con lo que se reclutarán más seguidores que también lo retuitearán y acabará por estallar una tormenta de tuits en la plataforma. Del mismo modo, cuando alteramos la BHE en el experimento, las neuronas no se desorientaron de inmediato, pero dedicaron la semana siguiente a construir una nueva red de conexiones, tras la cual una pequeña sacudida provocó una gran tormenta eléctrica. Estos patrones, que denominamos episodios paroxísticos de ondas lentas, son similares a la actividad encefálica observada por otros científicos en personas diagnosticadas de alzhéimer o epilepsia.

Esta tormenta se produjo únicamente tras reproducir una fuga de la BHE. Sin ella, no se desató ninguna tormenta eléctrica en los cortes de tejido cerebral. Por consiguiente, planteamos la hipótesis de que algún elemento de la sangre llegaba a estas neuronas y desencadenaba la reacción cerebral. Pusimos a prueba esta teoría en una rata joven y sana, con una BHE normal, a la cual inyectamos sangre directamente en el cerebro (sorteando así la barrera) y registramos después la actividad eléctrica. Tardó varios días en generarse, pero volvió a estallar la tormenta. Sin duda, algo tuvo que ver con la sangre. Pero este líquido complejo contiene muchos tipos de células y proteínas, lo que nos llevó a emprender una minuciosa tarea de filtrado y bloqueo para aislar al responsable de las alteraciones. Resultó ser una proteína hemática: la albúmina.

LOS INICIOS DEL PROBLEMA

Nuestro hallazgo no era demasiado alentador. La albúmina es muy común e interviene en múltiples funciones corporales, por lo que fue difícil identificar su cometido en esta situación. Habríamos preferido un componente más insólito, pero tuvimos que centrarnos en la albúmina. Kaufer se trasladó a la Universidad de California en Berkeley para dirigir su propio laboratorio, y Friedman instaló el suyo, primero en la Universidad Ben-Gurión del Néguev, en Israel, y luego en la Universidad Dalhousie, en Nueva Escocia. Planificamos una serie de experimentos conjuntos a larga distancia para varios años, con objeto de describir los pasos desde la alteración de la BHE y la fuga de albúmina hasta la aparición de los trastornos neurológicos.

Lo primero que aprendimos fue que, tras penetrar en el cerebro, la albúmina estimula los astrocitos, unas células esenciales que prestan apoyo estructural y químico a las neuronas y sus conexiones. Cuando la proteína entra en contacto con un astrocito, se une a unos receptores que suelen actuar como estaciones de acoplamiento de una molécula llamada factor de crecimiento transformante beta (TGFβ). Entre otras funciones, el TGFβ activa los astrocitos y la microglia, un tipo de células centinela, para iniciar la inflamación. En condiciones normales, el cerebro limita los daños mediante una inflamación localizada con la que destruye las células defectuosas en un ataque dirigido. Pero si la albúmina continúa filtrándose, se produce una hiperestimulación de los astrocitos y de la microglía y se libera gran cantidad de sustancias nocivas, con sobreabundancia de

TGFβ. Multitud de células resultan dañadas, y los circuitos neuronales esenciales se ven modificados o debilitados, por lo que su funcionamiento se deteriora. Los médicos observan a menudo esta misma cascada destructiva en pacientes que han sufrido un traumatismo craneoencefálico; a veces, ocasiona ataques epilépticos.

La secuencia también se reproduce con el envejecimiento, como averiguamos en los ratones. Estos animales suelen vivir, por término medio, poco más de dos años. Dejamos envejecer tranquilamente a una colonia de ratones, cuyo encéfalo examinamos en diversos momentos. No detectamos albúmina en ninguno de los jóvenes, pero empezó a aparecer en la mediana edad. El efecto fue moderado al principio, aunque se produjo un claro deterioro de la integridad de la barrera, que empeoró a medida que los ratones envejecían. Los animales afectados también tuvieron mayor dificultad para recordar el camino en los laberintos que sus homólogos más jóvenes y sin apenas albúmina.

Otros experimentos nos demostraron que, cuando apareció la proteína, el TGFβ inició su actividad. Teñimos el cerebro de manera que se resaltara la forma activada del factor de crecimiento, así como los astrocitos que lo producían. La inflamación debida al TGFβ siempre comenzaba después de aparecer la albúmina y empeoraba a medida que se intensificaba su filtración. Esta relación fue especialmente notoria en el hipocampo, una región clave en la regulación de la memoria.

En estos últimos cinco años, hemos recabado datos que demuestran el desarrollo de este mismo proceso en las personas. Marcamos las señales de fuga de la barrera mediante moléculas trazadoras en individuos de entre la veintena y la setentena. La resonancia magnética reveló que el grado de estos goteos aumentaba con el envejecimiento. Otros investigadores, como Berislav V. Zlokovic, de la Escuela de Medicina Keck de la Universidad del Sur de California, y sus colaboradores, utilizaron técnicas de diagnóstico por la imagen ligeramente diferentes para mostrar la degradación de la barrera en personas de edad avanzada con deterioro cognitivo. En nuestro trabajo, las autopsias de otro grupo de personas pusieron de manifiesto que los niveles elevados de albúmina se acompañaban de mayores cantidades de TGFβ, siempre en los astrocitos. Estas concentraciones fueron más altas en los ancianos y también aumentaron en los que habían fallecido de alzhéimer respecto a los que no padecían la enfermedad.

REJUVENECIMIENTO CEREBRAL

A continuación, revertimos el deterioro en los ratones. No logramos evitar que la albúmina comenzara a filtrarse a través de la BHE, pero conseguimos bloquear la cascada del TGFβ que

tenía lugar después de las fugas. Criamos un grupo de ratones a los que habíamos suprimido genéticamente la porción de ADN responsable de la producción de receptores de TGFβ por los astrocitos, con lo que eliminamos esa característica de las células. Cuando aún eran relativamente jóvenes, les implantamos en el cerebro una bomba minúscula que inyectaba albúmina. Hicimos lo mismo con un grupo de ratones jóvenes normales. Después introdujimos ambos grupos en un complicado laberinto de agua. (Ver nadar a los ratones parece ser una constante entre nosotros.) Los animales normales con receptores pasaron muchos apuros. En cambio, los que carecían de ellos nadaron por el laberinto como si fueran jóvenes y sanos, con rapidez y precisión, y cuando cambiamos la configuración del recorrido, también aprendieron la nueva ruta. En el examen del cerebro observamos niveles bajos de inflamación y escasa actividad eléctrica anómala.

Fue muy alentador. Pero, en los humanos, eliminar el gen de una característica cerebral no va a ser una opción terapéutica en un futuro cercano. En cambio, existe otra posibilidad. Barry Hart, químico de Innovation Pathways, una empresa farmacéutica emergente de Palo Alto, en California, había diseñado un medicamento antitumoral que bloqueaba específicamente la actividad del receptor TGFβ. Hart se puso en contacto con nosotros y nos propuso ensayar el fármaco, llamado IPW, en nuestros ratones. (Los tres fundamos después una empresa para proseguir el desarrollo del producto.)

Al administrarlo a ratones de mediana edad —los que comenzaban a mostrar fugas de albúmina—, comprobamos que su cerebro parecía joven de nuevo. La actividad del TGFβ descendió a los niveles observados en los juveniles, los marcadores de inflamación se redujeron notablemente, y tanto la actividad eléctrica anómala como la propensión a las convulsiones disminuyeron.

Pero la gran sorpresa surgió cuando examinamos el comportamiento y la cognición reales. Montamos otro laberinto y esta vez introdujimos ratones viejos. Algunos de ellos recibieron tratamiento con IPW y otros no. No preveíamos grandes mejorías, pues creíamos que ya se habían producido daños irreversibles. (Nuestros ratones sin el gen de TGFβ se habían librado de los largos meses de deterioro debidos a la cascada inflamatoria, pero estos animales, no.) No obstante, en cuestión de días, los ratones tratados aprendieron el laberinto casi igual de bien que a los que les doblaban la edad. Los ratones no tratados simplemente renquearon como de costumbre. Además, los que recibieron IPW no mostraron signos del efecto de «tormenta de Twitter» que suele observarse en humanos con alzhéimer o epilepsia, y apenas hubo indicios de inflamación. Era como si se hubiera disipado una niebla inflamatoria y el cerebro recuperara sus habilidades juveniles. Estos resultados, junto con los de los estudios en humanos, son los que publicamos en 2019 en *Science Translational Medicine*.

El hallazgo del laberinto fue muy inesperado, incluso para nosotros, porque pensábamos, como la mayoría de la gente, que los daños por el envejecimiento son un viaje de ida, un deterioro imposible de remediar. Es probable que así suceda en el caso de los trastornos neurológicos graves, como los estragos que acarrea la enfermedad de Parkinson o la de Alzheimer avanzada, cuando la cantidad de amiloide beta acumulada es tal que destruye franjas de neuronas y otras células. Pero nuestra investigación sobre esta intervención parece indicar que, si la muerte celular no es muy extensa, el cerebro envejecido posee una capacidad oculta para recuperarse de ciertos tipos de daños.

Y nuestros descubrimientos no solo atañen al deterioro gradual, sino también a las lesiones agudas. El tratamiento de roedores con IPW tras una conmoción cerebral o un traumatismo craneoencefálico atenuó la inflamación, las convulsiones y el deterioro cognitivo resultantes. Los animales que recibieron un placebo no mostraron mejoría.

REPARACIÓN DEL DAÑO

La población mundial está envejeciendo, y el número de personas con demencias y alzhéimer crece sin cesar. Nosotros también nos hacemos mayores, así que es un asunto personal. Ambos rondamos la cincuentena y nuestras charlas en las cenas con los amigos giran a menudo en torno a cómo nos afecta el envejecimiento corporal (algunos solíamos correr maratones y ahora ni siquiera llegamos a terminar una clase de zumba) e intelectual (Kaufer es incapaz de recordar el nombre de otros padres de la clase de su hija en el colegio). La neurociencia aún no ha explicado los primeros desencadenantes de esta transición del cerebro joven y sano al viejo y disfuncional. El alzhéimer y otras enfermedades neurológicas del envejecimiento son complejas y podrían obedecer a numerosas causas.

Ahora hay que sumar a ellas las fugas de la BHE. La teoría de la rotura de la barrera representa un nuevo modelo sumamente intuitivo y sencillo para comprender por qué el cerebro se deteriora con la edad. Y nos llena de optimismo: los resultados de nuestro trabajo parecen indicar claramente que el cerebro envejecido conserva la capacidad de remodelarse y repararse solo, una facultad que pueden abolir las fugas persistentes de la BHE y la consiguiente cadena de sucesos, pero que no se pierde de forma irremediable.

El siguiente paso para nosotros y otros científicos es buscar estrategias y tratamientos para reducir las filtraciones de la barrera. En el pasado, la investigación farmacéutica sobre la BHE se centró en las formas de aumentar la permeabilidad, no de reducirla, para permitir el paso de más medicamentos a través de ella con la intención de tratar infecciones o tumores encefálicos. Nuestros resultados indican que ha llegado el momento de darle la vuelta a la pregunta: ¿podemos encontrar formas de evitar que el escudo se degrade, impedir que lo atraviesen las sustancias nocivas o, cuando menos, interrumpir el efecto dominó molecular una vez desencadenado? Dar respuesta a estos interrogantes podría traer consigo un beneficio enorme para muchísimas personas. IyC

PARA SABER MÁS

Blood-brain barrier breakdown in the aging human hippocampus. Axel Montagne et al. en *Neuron*, vol. 85, págs. 296-302, enero de 2015.
Blood-brain barrier dysfunction in aging induces hyperactivation of TGFβ signaling and chronic yet reversible neural dysfunction. Vladimir V. Senatorov Jr. et al. en *Science Translational Medicine*, vol. 11, eaaw8283, diciembre de 2019.
Paroxysmal slow cortical activity in Alzheimer's disease and epilepsy is associated with blood-brain barrier dysfunction. Dan Z. Milikovsky et al. en *Science Translational Medicine*, vol. 11, eaaw8954, diciembre de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Barrera hematoencefálica. Grit Vollmer en *MyC*, n.º 21, 2006.
Romper la barrera cerebral. Jeneen Interlandi en *IyC*, agosto de 2013.
Las bases neurobiológicas del alzhéimer. Kenneth S. Kosik en *IyC*, julio de 2020.

por Sean Bailly

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Caos magnético en la galaxia del Remolino

Las últimas observaciones revelan una distorsión del campo magnético en la región exterior de los brazos

Situada a casi 31 millones de años luz, la galaxia del Remolino, o Messier 51, extiende sus espectaculares brazos. En ellos pueden apreciarse criaderos de estrellas: nubes de gas donde tiene lugar el proceso de formación estelar (*rojo*). Pese a ser una de las galaxias espirales más observadas y estudiadas, no deja de sorprender a los astrofísicos.

El campo magnético de Messier 51 ya había sido analizado por radiotelescopios, y las líneas de campo parecían reflejar la estructura de los brazos. Sin embargo, las últimas observaciones del Observatorio Estratosférico de Astronomía Infrarroja (SOFIA), un telescopio instalado a bordo de un Boeing 747, revelan un paisaje más caótico. Gracias al instrumento HAWC+ del observatorio aerotransportado, que opera en el infrarrojo lejano, los investigadores han descubierto que el campo magnético de la galaxia (*líneas claras*) se distorsiona en la región exterior de los brazos y presenta una estructura más compleja. Las causas probables de ello son una intensa formación estelar y la presencia de la galaxia vecina NGC 5195 (*amarillo*).

La cámara HAWC+ es sensible a la luz dispersada por las partículas de polvo presentes en las galaxias. Esas partículas se alinean perpendicularmente al campo magnético y polarizan la luz, lo que permite reconstruir la forma del campo magnético. En 2020, gracias a este instrumento, Enrique López Rodríguez, del centro Ames de la NASA, y sus colaboradores publicaron un trabajo en *The Astrophysical Journal* en el que demostraron que el campo magnético de una galaxia espiral desempeñaba una función fundamental en la adopción de su espectacular morfología.

—*Sean Bailly*





por Iñigo de Miguel Beriain y Antonio Diéguez Lucena

Iñigo de Miguel Beriain es investigador en la universidad del País Vasco y en la Fundación Vasca para la Ciencia Ikerbasque.

Antonio Diéguez Lucena es catedrático de filosofía de la ciencia en la Universidad de Málaga.



¿Explicar o predecir?

Cómo los algoritmos de inteligencia artificial están cambiando la metodología científica

Durante siglos, la ciencia ha desempeñado un papel fundamental en el florecimiento de la civilización gracias a su capacidad para dotarnos de una explicación acerca de cómo funciona el mundo y para anticipar las consecuencias de un curso causal determinado. Explicación cabal y prognosis eficiente son, en suma, las dos palabras clave que caracterizan los principales activos de la ciencia.

Tradicionalmente, y en especial desde que el Círculo de Viena analizara esta cuestión, la explicación y la predicción científicas se han considerado dos caras de la misma moneda: si se tiene una explicación científica genuina de un fenómeno, entonces habría sido posible predecirlo, y si puede predecirse científicamente un fenómeno, entonces es posible explicarlo. Es lo que se denomina la «tesis de la simetría». De acuerdo con ella, explicación y predicción comparten la misma estructura lógica. El mismo argumento que nos sirve para explicar el fenómeno una vez que sabemos que este se ha producido nos habría permitido predecirlo antes de que se produjera. La diferencia entre explicar y predecir es, pues, únicamente pragmática. Se reduce al momento en que se formula el argumento: si se formula antes de conocer el fenómeno, predecimos; si se formula después, explicamos.

Cabe admitir que, en ciertos fenómenos, como pueden ser los biológicos —especialmente los evolutivos— o los sociales, la complejidad de los factores que intervienen genera dificultades de tipo práctico para realizar predicciones realmente precisas y podemos tener explicaciones aceptables que no lleven a predicciones relevantes. Sin embargo, en lo que se refiere a la posibilidad inversa, es decir, a la de predecir sin tener capacidad para explicar, se estima que no se dispone de una predicción científica genuina si no se puede proporcionar con los mismos recursos teóricos una explicación de los fenómenos concernidos.



Sin embargo, a día de hoy este escenario no es tan firme como lo era hace unos años. Para empezar, la tesis de la simetría entre explicación y predicción recibió, ya desde el comienzo, críticas de entidad considerable. Como han argumentado diversos autores, la predicción científica podría basarse en un conjunto de datos sin necesidad de recurrir a ninguna ley, careciendo, por tanto, de capacidad explicativa. Tomemos el caso de los sistemas sensibles a las condiciones iniciales o, en lenguaje más popular, el de los sistemas que presentan el llamado «efecto mariposa». Se trata de sistemas caóticos cuyo comportamiento puede ser explicado científicamente mediante leyes deterministas. Sin embargo, su resultado final es altamente imprevisible en la práctica, debido a los efectos multiplicadores que experimentan las diferencias infinitesimales en las condiciones iniciales de las que se parte en cada caso concreto.

Por otro lado, hace ya tiempo que percibimos señales de que nuestra capacidad de construir modelos científicos que permitan explicar el mundo se está enfrentando con algunos límites epistémicos. Esto resulta cada vez más obvio en campos como los de la astrofísica o la biología. En astrofísica, la teoría inflacionaria del universo o la propuesta teórica de los multiversos han sido criticadas por la imposibilidad de ser sometidas a contrastación empírica, lo cual las alejaría del cumplimiento de un requisito considerado hasta ahora básico para cualquier teoría científica. En el caso de la teoría inflacionaria del universo, existen demasiados modelos que no pueden ser discriminados en función de la evidencia disponible, o como suele decirse con un tecnicismo, se trata de modelos infradeterminados por la evidencia empírica. Cierto que estos modelos conducen a predicciones distintas, pero la flexibilidad de la teoría permite que cualquier dato empírico pueda ser finalmente acomodado, impidiéndose así la falsabilidad de dicha teoría. Algo similar puede decirse de la teoría de los multiversos, al menos en algunas de sus versiones: no conduce a predicciones contrastables empíricamente y, por tanto, su carácter científico podría ser cuestionado sobre esa base. Esto mismo, por cierto, se ha sostenido con respecto a otra teoría física de gran relevancia, como es la teoría de cuerdas.

GETTY IMAGES/ANDREYPOPOV/ISTOCK

En biología, la investigación actual muestra que el funcionamiento de los mecanismos genéticos resulta extremadamente más complejo de lo que suponíamos hace unos años. La posibilidad de dominar nuestro ADN se nos escapa paulatinamente, no ya solo por las múltiples relaciones entre unos genes y otros, sino por la conciencia creciente del papel esencial que desempeña la epigenética en su expresión concreta. De ahí la dificultad de situar nuestras esperanzas en la aparición de un modelo científico capaz de proporcionarnos una explicación detallada sobre cómo funciona el genoma en toda su complejidad y, menos aún, que sea tan preciso como para confiar ciegamente en su capacidad de prognosis.

Cada vez resulta más evidente que los métodos empleados tradicionalmente por la ciencia ya no son adecuados para satisfacer plenamente las necesidades de la propia ciencia. La complejidad del mundo que se pretende modelar ha superado esas capacidades. Si durante un tiempo no hemos procedido a emplear una alternativa a su monopolio, ha sido porque no la había. Ahora, no obstante, las circunstancias están cambiando. Hace ya tiempo que conocemos algunos casos de acciones humanas exitosas basadas en metodologías que no siguen patrones científicos tradicionales. Quizás un buen ejemplo, tal como señalaba en *Wired* Chris Anderson, sea la secuenciación génica aleatoria (*shotgun gene sequencing*), usada por Craig Venter en Celera Genomics para obtener la secuencia completa del genoma humano. Esta técnica puede considerarse una pionera del cambio a gran escala representado por la aparición de unas herramientas nuevas, los algoritmos computacionales (en este caso algoritmos ensambladores) y una nueva forma de entender la función de la computación en la ciencia.

La aparición de los algoritmos, y especialmente de algoritmos predictivos, es el resultado del uso combinado de unas posibilidades de almacenamiento y procesamiento de datos nunca antes conocidos. Estas herramientas son capaces de desplegar una capacidad predictiva que supera ya —y en un futuro es previsible que supere aún en mayor medida— la que puede proporcionarnos cualquier modelo desarrollado siguiendo los métodos científicos tradicionales. Por citar un ejemplo que saltó a la prensa en mayo, un equipo japonés ha presentado en la revista *Heart* un algoritmo que predice con un 90 por ciento de aciertos la incidencia de paros cardíacos en función de ciertas condiciones meteorológicas.

La metodología científica tradicional se basa en la contrastación empírica de hipótesis y modelos teóricos acerca del comportamiento de los fenómenos; hipótesis y modelos que pueden resultar confirmados o falsados. Los algoritmos predictivos, en cambio, no siguen ese patrón. Su creación parte de la inferencia de correlaciones entre diferentes variables sobre la base de un análisis estadístico automatizado de enormes bases de datos. Los algoritmos nunca buscan causalidades, sino solo correlaciones. De ahí, por supuesto, que no expliquen, sino que solo anticipen. Pero algunos predicen con una exactitud que desafía a lo que ha podido lograr la ciencia hasta este momento.

Se hace cada vez más verosímil una situación en que la fuerza [predictiva] de la inteligencia artificial acabe por desplazar a la teorización científica

La cuestión fundamental que plantea este escenario es que se hace cada vez más verosímil una situación en que la fuerza de la inteligencia artificial acabe por desplazar a la teorización científica en muchos campos, al menos en lo que se refiere a su función predictiva. Probablemente, el punto de inflexión se produzca el día en que tengamos que decidir qué curso de acción queremos seguir cuando ambas estrategias planteen soluciones inconciliables. Si en ese momento nos decantamos por la opción que recomienda la IA, esto es, la opción antiteórica, habremos dado un paso difícil de revertir. Porque en ese momento certificaremos nuestra preferencia por la funcionalidad y alta precisión de la predicción estadística antes que por las explicaciones aproximadamente verdaderas proporcionadas por las teorías y las hipótesis científicas.

Ese momento, de hecho, ha llegado en algunos ámbitos, en los que la posibilidad de trazar predicciones exactas y detalladas a través de diversos algoritmos ha provocado que ya no se profundice en los mecanismos o lazos causales que llevan de un fenómeno a otro, y, en consecuencia, no se nos proporciona una comprensión cabal del modo en que acontecen dichos fenómenos. Ciertamente, estas predicciones exactas pero sin capacidad explicativa pueden servir para poner a prueba y mejorar modelos explicativos, o incluso orientar en el hallazgo de otros nuevos. Sin embargo, poner todo el peso en ellas descuidando la importancia de los modelos causales implica un abandono claro de una de las dos finalidades principales de la ciencia: la de proporcionar explicaciones además de predicciones.

El que todavía no nos hayamos dado cuenta de la enorme magnitud del cambio que se avecina no le resta un ápice de importancia. En suma, parece que se abre ante nuestros ojos un futuro en que es probable que la ciencia (tal y como tradicionalmente hemos entendido este concepto) pase a ser principalmente, si no únicamente, un recurso explicativo, mientras que su antiguo rol de anticipación de escenarios futuros será desempeñado por los sistemas basados en la inteligencia artificial. Y no parece que ese futuro vaya a esperar demasiado para hacerse presente. IyC

PARA SABER MÁS

Explanation and prediction in evolutionary theory. Michael Scriven en Science, vol. 130, n.º 3374, págs. 477-482, agosto de 1959.

The anatomy of inquiry. Philosophical studies in the theory of science. Israel Scheffler. Knopf, 1963.

The end of theory: the data deluge makes the scientific method obsolete. Chris Anderson en *Wired Magazine*, junio de 2008.

To explain or to predict? Galit Shmueli en *Statistical Science*, vol. 25, n.º 3, págs. 289-310, agosto de 2010.

Scientific method: Defend the integrity of physics. George Ellis y Joe Silk en *Nature*, vol. 516, n.º 7531, págs. 321-323, diciembre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

La naturaleza de la prueba científica en la era de las simulaciones. Kevin Heng en *IyC*, mayo de 2015.

Los límites del método científico. Adán Sus en *IyC*, abril de 2016.

Inteligencia artificial y plegamiento de proteínas. Ewen Callaway en *IyC*, febrero de 2021.

por Robin Lovell-Badge

Robin Lovell-Badge es biólogo del desarrollo y experto en células madre del Instituto Francis Crick de Londres.



Nuevas normas sobre células madre

Recomiendan relajar la «regla de los 14 días» para el cultivo de embriones humanos

En los últimos cinco años, se ha conseguido mantener vivos embriones humanos en cultivo durante más tiempo de lo que se creía posible; y, a partir de células madre, se han generado estructuras de una complejidad sin precedentes que imitan a los embriones y los órganos. Quizá más llamativo aún sea la creación de quimeras de animales y humanos mediante la inyección de células de una especie en embriones de otra, con las que se podría fabricar, por ejemplo, un corazón humano dentro de un cerdo. Otros avances importantes han sido la producción de óvulos y espermatozoides a partir de células madre, la edición de genomas y la reposición de orgánulos en las células. Todos ellos están mejorando nuestros conocimientos biológicos y podrían contribuir a tratar o evitar enfermedades humanas.

Pero a algunas personas les inquieta tales avances, ya que plantean cuestiones espinosas desde la perspectiva de la ética, las creencias, las normas y los valores. La mayoría de los científicos desean unos límites claros que definan qué experimentos son aceptables, tanto legalmente como para la sociedad. Y la población necesita que se garantice su seguridad. Por ello, la Sociedad Internacional para la Investigación con Células Madre (ISSCR) ha actualizado sus directrices para reflejar la ciencia de hoy. Estas pautas constituyen la referencia que consultan científicos, legisladores, patrocinadores, revistas y otros encargados de evaluar las investigaciones.

Las nuevas directrices, publicadas el pasado mayo, las ha producido un grupo de trabajo que presidí integrado por científicos, médicos, bioéticos, juristas y especialistas en política. ¿Qué cambios recomendamos? Tal vez el más destacado sea relajar la «regla de los 14 días», el límite para el cultivo de embriones humanos, incorporada en la legislación de una docena de países, entre ellos España. A partir de ese momento, poco antes de que aparezcan los primeros signos del sistema nervioso central, deben destruirse los embriones.

Cuando se propuso ese límite, hace unos 40 años, no se podía cultivar embriones humanos mucho más allá de los cinco días, el momento de la implantación. Pero hoy sí. Así que dicha regla impide el estudio de un período crítico, entre los 14 y los 28 días, cuando queda establecida la organización de los tejidos. Se cree que los fallos en esta etapa son responsables de abortos espontáneos recurrentes y anomalías congénitas, como las del corazón y la columna vertebral.



Hoy también es posible crear, a partir de células madre, estructuras muy parecidas a los embriones. Probablemente estas no se desarrollarían con normalidad si se implantaran en un útero (de hecho, nuestras directrices lo prohíben). Pero nos aportarían información valiosa sobre el período que va de los 14 a los 28 días. Los conocimientos adquiridos, como la obtención de gametos in vitro, podrían contribuir a resolver el aborto espontáneo y la infertilidad. También servirían para evaluar técnicas, como la edición del genoma, dirigidas a evitar enfermedades genéticas.

Hasta ahora, la regla de los 14 días ha resultado provechosa para la ciencia. Ha permitido llevar a cabo investigaciones esenciales para numerosas técnicas de reproducción asistida ante una fuerte oposición, sobre todo de grupos religiosos. Incluso los científicos que consideraban arbitrario el límite de tiempo fueron reacios a desechar un compromiso alcanzado con la participación de la sociedad.

La solución de la ISSCR es exigir la revisión y la aprobación de las propuestas para el estudio de embriones más allá de los 14 días. (El proceso de autorización, ya sea por una institución o por un organismo nacional, varía según el país, pero siempre debe contar con especialistas y legos en la materia.) Un requisito importante es que cada propuesta se analice por separado, sopesando si se justifica la investigación por el valor que la información aportará, o si existen otras formas de obtenerla. Para autorizar un proyecto, se requerirá el respaldo suficiente de la sociedad, y se tendrán en cuenta aspectos de justicia social.

En las directrices anteriores, la ISSCR estableció tres grandes clases de experimentos: prohibidos; permitidos con revisión y supervisión específicas; y permitidos en general. Ahora les hemos añadido matices. Abogamos por prohibir ciertas investigaciones, como la reproducción de animales con gametos humanos. Otras, como la edición del genoma heredable, no están permitidos hoy pero podrían estarlo algún día, si se cuenta con pruebas de seguridad y eficacia y el respaldo social. Las directrices desaconsejan la comercialización prematura de técnicas con células madre y proponen formas de restringir las actividades de clínicas deshonestas.

Esa supervisión es más complicada pero más útil. Las prohibiciones generales consagradas por la ley atraen por su simplicidad, pero no resuelven los dilemas de la población; además, son más vulnerables al dogma o al instinto y pueden dejar de ajustarse a las pruebas. Las directrices de las sociedades científicas internacionales son un instrumento de primer orden para infundir confianza a los científicos y a la ciudadanía.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 593, pág. 479, 2021. Traducido y adaptado con el permiso de Nature Research Group © 2021

Con la colaboración de nature

por José Manuel López Nicolás

José Manuel López Nicolás, catedrático de bioquímica y biología molecular en la Universidad de Murcia, investiga y escribe sobre nutrición y tecnología de los alimentos.



La trampa de los alimentos «sin pesticidas»

Una estrategia de *marketing* basada en el miedo, no en los datos.

El miedo vende y los departamentos de *marketing* lo saben. Por esta razón, encontramos infinidad de productos que usan eslóganes quimiofóbicos para atraer al consumidor: «sin colorantes», «sin conservantes», «sin transgénicos», «sin ingredientes químicos»... ¡incluso se han comercializado productos «sin porquerías»! La estrategia de este «mundo "sin"» consiste en sembrar dudas sobre la seguridad alimentaria de un ingrediente y luego presumir de que el producto en cuestión, mucho más caro, no contiene dicho ingrediente.

Uno de los reclamos más de moda es el famoso «sin pesticidas». Lo encontramos en alimentos infantiles, frutas, verduras, hortalizas, etcétera. Cada vez que lo leo me hago la misma pregunta: ¿me están queriendo decir que los alimentos que no usan este eslogan contienen pesticidas peligrosos? Veamos qué dicen los datos.

Hace unas semanas, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) hizo público el último informe sobre su control de residuos de plaguicidas (término más correcto que pesticidas) en los alimentos de la UE correspondiente al año 2019 (estos informes tienen un desfase de dos años debido a las dificultades que conlleva recabar, procesar y analizar la información). El documento recoge, entre otras, las actividades de control llevadas a cabo a nivel nacional por los Estados miembros de la UE, Islandia y Noruega. También muestra datos del programa de control coordinado por la UE que utiliza una estrategia de muestreo aleatorio.

Se han analizado muestras aleatorias de doce productos: manzanas, repollos, lechugas, melocotones, espinacas, fresas, tomates, avena en grano, cebada en grano, vino, leche de vaca y grasa porcina. Los resultados no dejan lugar a duda: el nivel de seguridad alimentaria en el campo de los plaguicidas es altísimo.

En los programas nacionales, se analizaron 96.302 muestras. El 96,1 % presentó restos de plaguicidas por debajo de los límites permitidos; únicamente sobrepasó ese umbral el 3,9 %.

En el programa global coordinado de la UE, el grado de cumplimiento llegó al 98 %. De las 12.579 muestras analizadas, el 53 % no contenía ni rastro de plaguicidas, mientras que el 45 % presentó restos por debajo de los límites permitidos. Solo el 2 % sobrepasó esos límites.



GETTY IMAGES/FLOORTJE/ISTOCK, MODIFICADO POR *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

De entre todos los plaguicidas analizados, el más polémico es, sin duda, el glifosato. Pues bien, únicamente el 0,1 % de los alimentos superó el nivel de glifosato permitido. En el resto, o bien no se detectó o su presencia estuvo por debajo de los límites.

Una de las afirmaciones más escuchadas en el mundo de la alimentación es que los productos ecológicos son más sanos que los normales debido a que contienen muchos menos plaguicidas. No es cierto. Aunque el informe de la EFSA refleja que el número de muestras con plaguicidas es inferior en los alimentos de origen vegetal ecológicos que en los elaborados de forma estándar —no ocurre lo mismo en las muestras de origen animal—, prácticamente todas las muestras analizadas están dentro de los límites permitidos. Además, la EFSA también ha evaluado el riesgo dietético. Conclusión: es poco probable que los productos analizados (bien sean ecológicos o convencionales) planteen alguna preocupación para la salud de los consumidores.

Un paseo por los supermercados muestra que los alimentos para bebés, principalmente potitos, son los que más emplean el eslogan «sin pesticidas». En este caso, al *marketing* del miedo se le suma el *marketing* emocional —¿quién se va a resistir a comprar para su bebé potitos «sin pesticidas», aunque su precio triplique el de los potitos normales?—. Pues bien, de las más de 1500 muestras de alimentos para bebés analizadas en la UE, únicamente un 1,3 % sobrepasó los límites. Del resto, un 97,8 % no contenía ningún rastro de plaguicidas y un 0,9 % presentó residuos por debajo de los límites permitidos.

Acabo, pero no sin antes compartir una reflexión. Si las autoridades europeas publican informes periódicos que demuestran el poco sentido que tiene asustar al consumidor con la posible presencia de plaguicidas en alimentos, ¿por qué se permite el eslogan «sin pesticidas», que fomenta el miedo irracional hacia los alimentos convencionales? Aunque el riesgo cero no existe y los sistemas de control siempre son mejorables, nunca antes los alimentos habían sido tan seguros. No dejen que les metan miedo con el «mundo sin».



ORNITOLOGÍA

El anillamiento científico de las aves

El empleo de este método, que permite desentrañar los misterios de las migraciones y los cambios en las poblaciones, se remonta a hace más de cien años. ¿Cómo ha evolucionado desde entonces?

Arantza Leal



LOS ESTORNINOS, del grupo de los paseriformes, fueron las aves con las que se inició el anillamiento científico, hace más de cien años, cuando el ornitólogo danés Christian C. Mortensen se propuso conocer sus rutas migratorias.

Arantza Leal Nebot es bióloga y desde 2013 trabaja como técnica en la oficina de anillamiento de la Sociedad Española de Ornitología (SEO/BirdLife). Coordina el programa de anillamiento Paser, para el estudio de las aves comunes en época reproductora.



Las aves son uno de los grupos animales más fáciles de observar en la naturaleza. Sus desplazamientos a lo largo del año, con su llegada y partida en distintas estaciones, han despertado desde siempre la curiosidad de los humanos. En la Antigua Grecia ya se preguntaban adónde iban las golondrinas cuando se ausentaban en invierno. Los textos de Aristóteles aluden a ellas, a las cigüeñas blancas y a otras aves, y explican que hibernan, igual que hacen los osos. Se pensaba, pues, que no partían en invierno, sino que simplemente se escondían. En el siglo xviii, el naturalista y ornitólogo Gilbert White, en su obra *La historia natural de Selborne*, todavía relataba que las golondrinas se quedaban en Gran Bretaña durante la estación invernal.

No fue hasta finales del siglo xix cuando los enigmas sobre los desplazamientos y la migración de las aves comenzaron a resolverse gracias a la invención del anillamiento científico. Pero ¿cómo nació la idea?

Se sabe que los antiguos egipcios ya marcaban las aves, como los halcones peregrinos, a los que representaban en los jeroglíficos e incluso veneraban como una divinidad, el dios Horus. Estos se marcaban con anillos para que, si escapaban o se perdían, pudieran ser encontrados y devueltos a su propietario. El anillo era un objeto metálico cerrado por el que se introducía la pata del ave al poco de nacer, así podía colocarse sin problema y permanecer en el animal cuando crecía.

Los romanos hacían lo mismo con las aves de presa para cazar, e incluso llegaron a marcar golondrinas con lazos para intercambiarse mensajes entre las tropas. Tampoco podemos olvidar el uso desde la antigüedad, e incluso hasta nuestros días, de las palomas mensajeras, sobre todo en épocas de guerra. Actualmente, estas aves se utilizan en colombofilia y en concursos deportivos, en los que numerosos grupos y asociaciones marcan cada año miles de palomas nacidas en cautividad para este fin. Todas estas prácticas no dejan de ser una forma de marcaje de las aves. ¿Cómo se pasó de ellas al anillamiento científico que se hace en nuestros días? ¿Qué datos nos aporta sobre las aves y de qué modo se utiliza?

LOS PRIMEROS ANILLAMIENTOS

Un paso clave en los esfuerzos por desentrañar los misterios de la migración de las aves lo dio el ornitólogo Christian C. Mortensen en Dinamarca en 1890. Fue el primero en marcar aves, en concreto, unos estorninos pintos. Para ello empleó anillas metálicas, que, a diferencia de los anillos, son abiertas y se cierran en el momento del marcaje. Mortesen numeraba cada anilla e incluía su dirección, lo que hoy se conoce como «remite». En unos años fue perfeccionando el material de las anillas, pues las iniciales daban problemas (eran demasiado pesadas), y en 1899 comenzó a practicar lo que a partir de entonces y hasta nuestros días denominamos «anillamiento científico». A lo largo de su vida, recopiló datos de los numerosos ejemplares que anillaba, unos 6000, y así estableció las primeras rutas migratorias de las aves.

El anillamiento, al que siempre le añadimos el apellido de «científico», está siempre relacionado con el método científi-

EN SÍNTESIS

El anillamiento científico de las aves constituye una herramienta fundamental para estudiar sus desplazamientos, la dinámica de sus poblaciones, y otros parámetros que resultan valiosos para conocer su estado de conservación.

En Europa esta actividad se inició hace más de cien años; en España, hace noventa. Ello ha permitido obtener las series temporales de datos más largas de cualquier grupo animal.

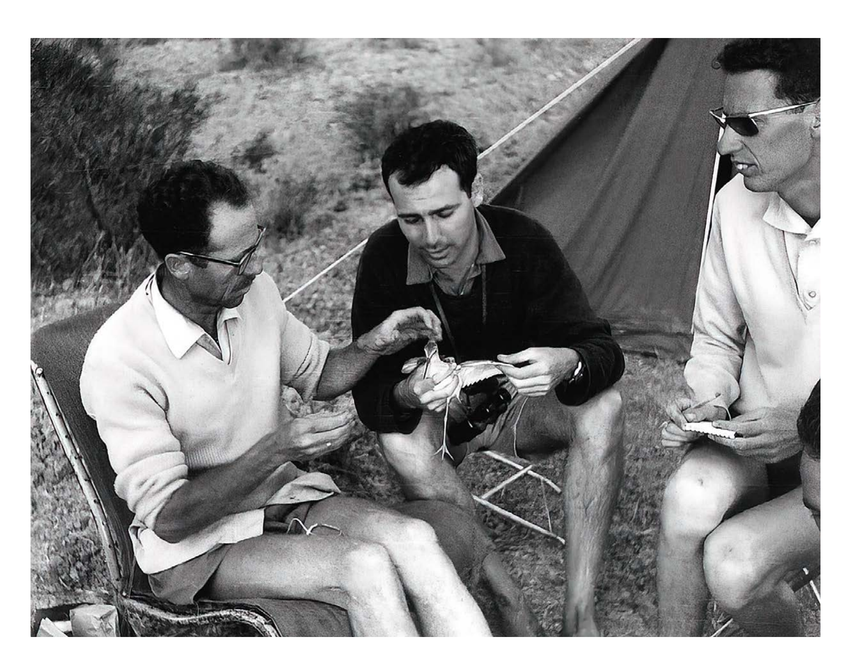
En la actualidad, las numerosas campañas y programas de anillamiento que se desarrollan en nuestro país persiguen fines muy diversos, como el seguimiento de especies o grupos de interés o amenazados, o el estudio de la evolución de sus poblaciones a lo largo del año.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/DRAKULIREN/ISTOCK

co e implica el uso de anillas grabadas con un código alfanumérico (o numérico) y una dirección o remite. Este corresponde a la oficina de anillamiento que ha generado las anillas. Por ejemplo, en España, SEO/BirdLife trabaja con el remite referido con las siglas ESS.

Con el anillamiento, cada ejemplar queda identificado de forma individual y de por vida. El proceso consiste en la captura de un ave, su identificación (especie) y colocación de la anilla. De cada ave se toman distintas medidas que se anotan en una hoja de campo en la que se indican la localidad, la fecha y la hora del marcaje, además del código de la anilla, la especie, la edad y el sexo, entre otros datos.

Las primeras aves que se anillaron en España fueron cigüeñas blancas, que se registraron con remite húngaro. Lo hizo un equipo magiar en 1930 en una de las «expediciones» (como se las denominaba entonces) que llevó a cabo en nuestro país. Estos ornitólogos estaban estudiando una población de cigüeñas en Hungría, y en esa época, cuando todavía no se sabía casi nada de su migración y en España no había anillas propias, decidieron desplazarse hasta aquí para seguir el rastro de las cigüeñas húngaras.



LA CIGÜEÑA BLANCA fue la primera especie anillada en España y de la que, por tanto, se disponen más datos en el tiempo. El anillamiento científico fue impulsado en nuestro país por el ornitólogo Francisco Bernis, que aparece en esta foto (*izquierda*) durante una campaña de 1964 en el Parque Nacional de Doñana.

En nuestro país, los anillamientos con marcas propias no se empezaron hasta 1931. Fueron promovidos por la Real Sociedad Española de Historia Natural, el Museo Nacional de Ciencias Naturales y el Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, en el El Pardo (Madrid), que continuaron con el marcaje de cigüeñas blancas iniciado por el equipo húngaro. Lamentablemente, durante la Guerra Civil se perdieron los registros de esos estudios debido al saqueo de las instalaciones del mencionado instituto, donde se custodiaban. En el período de posguerra la investigación de las aves se vio aletargada y no fue hasta 1952 cuando la Sociedad de Ciencias Aranzadi, del País Vasco, empezó a poner en marcha campañas de anillamiento utilizando su propio remite.

En 1954, se creó la Sociedad Española de Ornitología (hoy denominada SEO/BirdLife) y, con el apoyo y el interés de uno de sus fundadores, Francisco Bernis, el anillamiento científico comenzó a despegar. En 1957 se fundó el Centro de Migración de Aves, grupo de trabajo que se dedica exclusivamente al anillamiento dentro de la sociedad y que desde entonces ha venido empleando sin interrupción esta herramienta de estudio.

LAS PRIMERAS CAMPAÑAS

Al principio, al haber poca gente capacitada en el manejo y seguimiento de las aves, las investigaciones se enmarcaban en campañas de anillamiento en las que grupos de ornitólogos unían sus esfuerzos y conocimientos para llevar a cabo estudios conjuntos.

Una de estas primeras campañas se realizó en 1957 y se concentró en la cigüeña blanca. Fue diseñada y llevada a cabo bajo la supervisión de Bernis. Gracias a que el anillamiento de esta especie se inició tan pronto se han recopilado muchos datos sobre ella. De este modo, se ha logrado determinar el origen de las cigüeñas que atraviesan España para invernar en África y de las que se quedan en nuestro país, o los países africanos en los que invernan las cigüeñas españolas.

En 1966, se emprendió la primera campaña de anillamiento de aves paseriformes a escala nacional: en diez localidades repartidas por todo el territorio se capturaban y anillaban estas aves con redes japonesas (denominadas así porque en un primer momento procedían de Japón), conocidas también como redes de niebla. El objetivo consistía en estudiar su migración en primavera hasta nuestro país desde el norte de África, donde la mayoría pasan el invierno. Estas campañas, que se repitieron varios años, se bautizaron con el nombre de «operaciones *tarik*» (*tarik* significa «camino» en árabe).

Cabe resaltar que, hasta los años 80 del siglo pasado, no resultaba sencillo ni barato hacerse con el material necesario para poder llevar a cabo el anillamiento. De hecho, hasta 1979 no se distribuyeron ampliamente entre los anilladores las anillas con remite, que por entonces era «Ministerio de Agricultura-ICONA-Madrid-5. SPAIN» (el ICONA, o Instituto para la Conservación de la Naturaleza, fue el organismo público estatal responsable de la conservación y gestión de la naturaleza hasta 1991).

ORGANIZACIÓN NACIONAL E INTERNACIONAL

Actualmente, en España coexisten cuatro oficinas de anillamiento, con sus correspondientes remites, que están reconocidas por la Comisión Estatal para el Patrimonio Natural y la Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica, a escala nacional, y por la Unión Europea para el Anillamiento de las Aves (EURING), a escala europea. Además de la del propio ministerio, las otras oficinas son SEO/Birdlife, la Sociedad de Ciencias Aranzadi y el Instituto Catalán de Ornitología (ICO), la última en reconocerse.

Cada oficina gestiona las bases de datos generados por sus propios anilladores. Por ejemplo, la de SEO/BirdLife, que incluye unos 600 anilladores, registra anualmente cerca de 200.000 anillamientos y unas 40.000 recuperaciones (aves anilladas que se vuelven a capturar). Toda esta información se halla disponible en la web anillamientoseo.org, donde se detallan los remites

históricos utilizados desde los años 40 del siglo pasado. Los datos recopilados desde entonces corresponden a un total de 8 millones de anillamientos y más de 400.000 recuperaciones.

Los anilladores científicos reconocidos en España por las diferentes entidades avaladoras y oficinas de anillamiento son ciudadanos voluntarios que han de pasar por un largo período de formación (de al menos dos años) en el que aprenden técnicas de captura, manejo de las aves y toma de datos, entre otros aspectos.

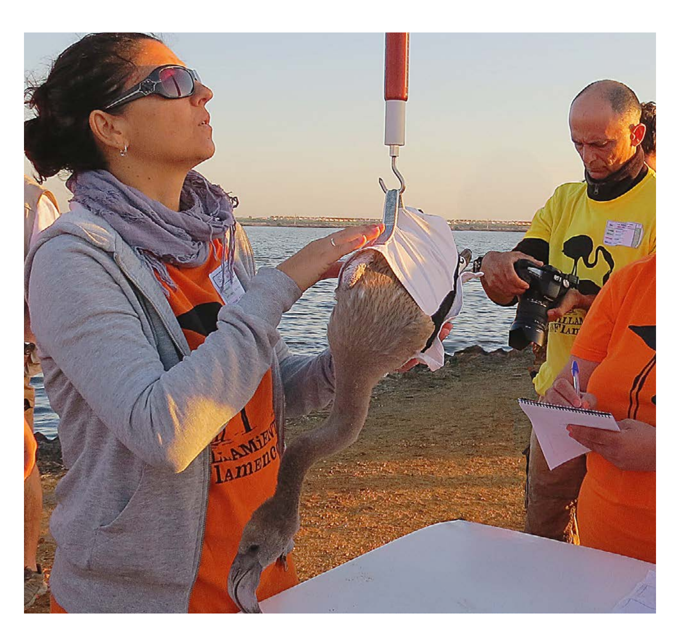
En sus inicios, la información recopilada por los distintos bancos se hallaba en formato papel, pero, con los años, se fue digitalizando, de modo que la comunicación entre las oficinas de anillamiento resulta ahora más sencilla y eficaz.

A medida que numerosos países iban estableciendo el anillamiento como una herramienta de trabajo para el estudio de las aves (en EE.UU., la oficina de anillamiento se fundó en 1920), tuvo que comenzarse a regular y coordinar esta actividad, pues las aves no saben de fronteras, y un petirrojo europeo anillado en invierno en el carrascal de la Font Roja, en Alcoy (Alicante), puede ser recuperado en verano en Suecia, donde cría, o viceversa (puede anillarse en verano en Suecia y recuperarse en invierno en Alcoy).

De este modo, en 1963 se creó en Europa la organización EURING, de la que el Centro de Migración de Aves de SEO/BirdLife fue miembro fundador, y en 1975 se estableció el banco de datos de EURING. Cada año, todas las oficinas de anillamiento de los países que forman parte de la entidad le remiten los datos de las aves anilladas recuperadas. El banco cuenta, por tanto, con series de datos de más de 50 años, y constituye uno de los más completos y de mayor volumen del mundo sobre un grupo animal.

CAMPAÑAS Y PROGRAMAS COORDINADOS

Desde el inicio del anillamiento científico se comprobó la eficacia de la colaboración entre anilladores para poder llevar a cabo estudios coordinados a escala local, nacional o internacional.



UN POLLO DE FLAMENCO de la laguna de Fuente de Piedra, en Málaga, es pesado durante una de las campañas de anillamiento que se realizan anualmente. Desde 1986 se hace un seguimiento de esta gran colonia nidificante de flamencos.

A lo largo de los años, SEO/BirdLife ha organizado y colaborado en numerosas campañas y programas de anillamiento tanto a escala nacional como internacional. Desde la primera campaña de cigüeñas coordinada por Bernis, se han sucedido numerosas iniciativas y proyectos. A escala europea, ejemplos destacados en los que participan anilladores y organizaciones de nuestro país son: el proyecto Piccole Isole («islas pequeñas»), que estudia la migración primaveral de las aves a través de las pequeñas islas del Mediterráneo, una barrera importante entre África y Europa; el proyecto Swallow («golondrina»), de EURING, que examinó la importancia de las zonas de descanso y alimentación durante la migración de la golondrina común; y EURO-CES, que coordina estaciones fijas repartidas por toda Europa para el anillamiento durante la época reproductora.

A escala nacional, cabe mencionar el programa Paser, que realiza el seguimiento de las aves comunes reproductoras en primavera; el programa Sylvia del ICO, que busca recopilar datos demográficos y tendencias poblacionales a largo plazo de las aves terrestres de Cataluña; las campañas del Grupo de Ornitología Balear (GOB) para conocer las migraciones en esas islas; y las que se realizan en la estación de anillamiento de Manecorro, de la Estación Biológica de Doñana, del CSIC (EBD-CSIC).

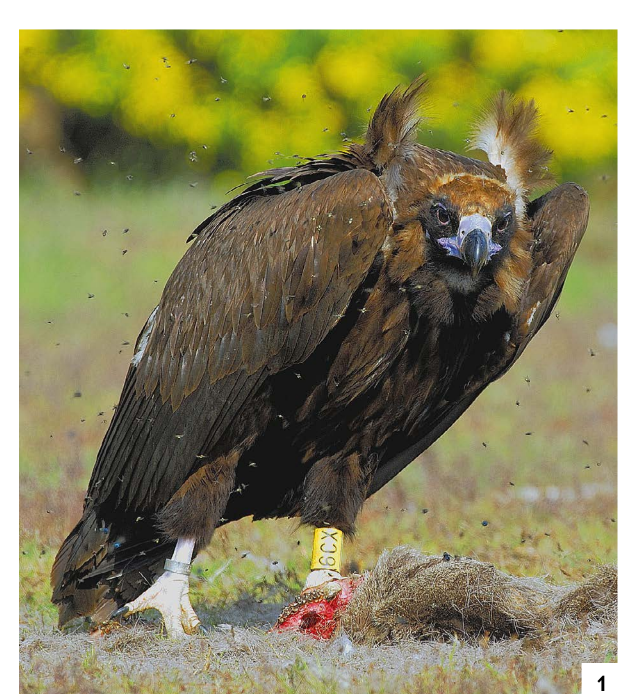
A estos programas se añaden campañas específicas para el anillamiento de grupos de interés, como el de los pollos de flamencos en la laguna de Fuente de Piedra, en Málaga; los buitres negros del valle del Lozoya, en Madrid; o los primillares, lugares de cría de las colonias de cernícalo primilla. Estos son unos pocos ejemplos de los proyectos que se desarrollan actualmente en nuestro país. Veamos con más detalle en qué consisten algunos de ellos.

LA COLONIA MÁS NUMEROSA DE FLAMENCOS

La laguna de Fuente de Piedra, en Málaga, es una extensa zona húmeda salina que acoge a la segunda colonia reproductora más importante de Europa de flamencos después de la de la Camarga francesa. En el humedal, de unas 1400 hectáreas de superficie, se forman pequeños islotes en las zonas centrales, lo que permite a los flamencos crear sus colonias de nidificación, siempre alejadas de la orilla para que la incubación y posterior supervivencia de los pollos no se vea afectada por la presencia de depredadores. En general, las colonias reproductoras, o nidificantes, se mantienen año tras año a no ser que se produzca un desastre ambiental que impida la reproducción.

Desde 1986, se realiza el marcaje de los pollos de flamenco con la participación de numerosos voluntarios. Hablamos de marcaje porque, además de la anilla metálica con remite oficial, se les coloca otra que puede leerse a distancia, con la ayuda de prismáticos o incluso con la toma de fotografías. Esta segunda anilla, que es de PVC y posee un código, siempre se asocia a la oficial de metal. Se utiliza en aquellas aves que son más fáciles de observar desde la distancia y que, por tanto, es posible identificar y registrar su presencia sin necesidad de volverlas a capturar. Grullas, flamencos, rapaces, limícolas y gaviotas son grupos de especies en las que se emplean ambos tipos de marcas. El color de las anillas de PVC y de sus dígitos varía según el país, lo que facilita la identificación y evita duplicidades entre países. En España suelen ser amarillas con los dígitos negros, y la oficina de la EBD-CSIC se encarga de coordinar el marcaje.

Desde 1986, se han anillado en la laguna un total de 18.000 flamencos. Gracias a ello, se ha podido hacer un seguimiento de





1 2

EL BUITRE NEGRO es una especie en peligro de extinción cuyas poblaciones en mejor estado se hallan en España (*1*). Gracias al anillamiento sistemático de los pollos con una anilla metálica oficial y otra de PVC amarilla, de lectura a distancia, se obtienen numerosos datos de estas poblaciones. Uno de los marcajes de pollos se lleva a cabo dentro del programa de seguimiento de la colonia de cría del Alto Lozoya, en la Sierra de Guadarrama, en Madrid (*2*).

los individuos nacidos en la colonia: por dónde se mueven o qué zonas utilizan para el descanso y para la alimentación, entre otros datos. Conocer el uso del territorio en las zonas de alrededor de la colonia permite adoptar medidas de conservación para continuar favoreciendo la cría de esta especie catalogada. Además, con el anillamiento se pueden deducir parámetros de reproducción, supervivencia y longevidad, así como de los desplazamientos migratorios. De este modo, pueden conocerse los movimientos de los flamencos en Europa, la dispersión de los juveniles, la conectividad entre lugares de cría o el cambio de parejas reproductoras en la temporada de cría.

EL BUITRE NEGRO EN LA SIERRA DE GUADARRAMA

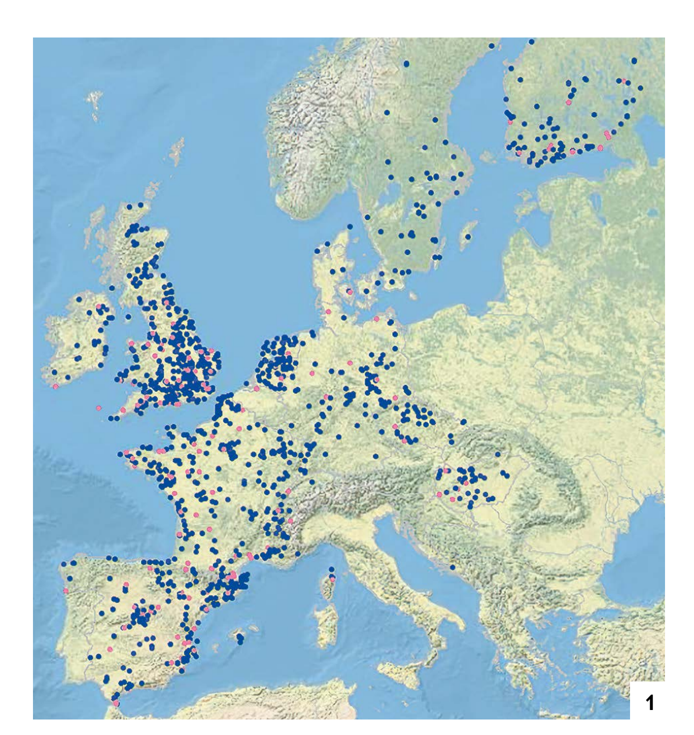
El buitre negro (*Aegypius monachus*) es una de las aves más amenazadas de Europa y está catalogada como «en peligro de extinción». Es una especie que habita en los bosques mediterráneos y en nuestro territorio conserva sus poblaciones en mejor estado de todo el mundo. Cuenta con unas 2000 parejas reproductoras que se distribuyen en distintas colonias de cría, entre las que figura la del Alto Lozoya, en la sierra de Guadarrama, en Madrid. Esta colonia es seguida desde 1999 por SEO/BirdLife en colaboración con el Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama. Además, está incluida en una Zona de Especial Protección para las Aves, o ZEPA. (Las ZEPA son áreas catalogadas por los estados miembros de la Unión Europea como zonas de singular relevancia para la conservación de la avifauna amenazada.)

Gracias a los anillamientos, es posible recopilar datos sobre su supervivencia, dispersión de juveniles, etcétera. Igual que en otros casos en los que los marcajes se centran en los pollos, se aprovecha el momento de captura para obtener el máximo de información de interés para la conservación de la especie. Se les hace así un control veterinario, con la toma de muestras de sangre y de datos biométricos o la medida de la carga parasitaria.

SEGUIMIENTO DE PASERIFORMES

En 1995, el Centro de Migración de Aves de SEO/BirdLife puso en funcionamiento el Plan de Anillamiento para el Seguimiento de Especies Reproductoras (Paser), con 15 estaciones repartidas por toda la geografía española. El programa emplea una metodología similar a la utilizada en el proyecto británico de Estaciones de Esfuerzo Constante (CES, por sus siglas en inglés). Tiene por fin el anillamiento continuado de aves comunes durante la época reproductora, en primavera. En nuestro caso, nos centramos en las paseriformes (pequeñas aves que cantan) y empleamos las redes japonesas como método de captura. Entre las que más se muestrean figuran el carricero común, la curruca capirotada, el petirrojo europeo, el cetia ruiseñor y el ruiseñor común.

La metodología es sencilla, pero requiere un seguimiento continuado y a lo largo de varios años, pues el objetivo es conocer las tendencias poblacionales de los paseriformes reproductores. Cada anillador o equipo de anilladores escoge un lugar que será su «estación de anillamiento» (se intenta mantener la estación el máximo número de años). En ese lugar, que ha de tener un hábitat homogéneo, como una zona de carrizal o de matorral mediterráneo, se intenta capturar al menos 20 individuos de al menos cinco especies durante una jornada de campo. Se extiende un número estándar de redes y se registran las capturas durante cinco horas desde el momento en que amanece. Todos los años, en la época reproductora, se establece un calendario en la que cada estación deberá realizar al menos 10 salidas. No todas las estaciones comienzan y acaban al mismo tiempo, pues cada especie se adapta a la climatología y fenología de la zona (las fechas de reproducción de una a otra pueden diferir en varias semanas). Al mantenerse un esfuerzo de muestreo constante y estandarizado, los datos son comparables a lo largo de los años y pueden integrarse con la información obtenida en otras estaciones que emplean el mismo método.





EL PROGRAMA EURO-CES se coordina a escala europea y tiene por objeto establecer una misma metodología en el continente para el seguimiento de las aves comunes en la época reproductora. Para ello se establecen estaciones fijas repartidas por todo el continente (*1; los puntos azules son las estaciones activas, y los rosas, las que ya no lo son*). En ellas se realiza la captura, toma de datos y anillamiento de las aves, como las que realiza el programa Paser en España, que remite a EURO-CES sus datos (*2*).

De las 15 estaciones de las que se partió en 1995 se llegó a 71 (aunque la cifra actual es menor), lo que ha permitido recopilar una extensa base de datos sobre la reproducción de las especies comunes de nuestro país. Gracias a ellos, podemos conocer las tendencias en los índices de productividad (proporción de los juveniles respecto a los adultos) de numerosos paseriformes. Además, permiten calcular tasas de supervivencia y recaptura, y diferencias entre clases de edad y sexo o incluso entre poblaciones.

Los datos se remiten anualmente a la oficina de coordinación europea EURO-CES para el análisis. Al combinar los datos de diferentes países, es posible comparar las tendencias poblacionales entre ellos y en el conjunto del continente. Además, la coordinación europea permite mantener reuniones, intercambiar información y debatir y resolver posibles problemas metodológicos.

En los últimos años se han publicado varios artículos con los resultados de los proyectos CES. Por ejemplo, a escala nacional, Carolina Remacha, de la Universidad Complutense de Madrid, y sus colaboradores, han demostrado que, en un período de 20 años, los ruiseñores comunes de varias estaciones del centro de España han reducido la longitud de las alas respecto al tamaño corporal, lo que está teniendo una repercusión negativa en su supervivencia.

A escala europea, Catriona A. Morrison, de la Universidad de Anglia Oriental, y sus colaboradores analizaron datos de 28 países y evaluaron las tendencias poblacionales de diferentes aves. Tras identificar las especies con mayor declive (coincidentes entre distintos países) propusieron las medidas adecuadas para su recuperación.

Siendo casi centenario en España, el anillamiento científico sigue gozando de buena salud. Su empleo en trabajos de investigación, en especial en los estudios de seguimiento a largo plazo, nos sigue proporcionando datos muy valiosos que nos ayudan a conocer qué está pasando en las poblaciones de aves silvestres y qué podemos hacer para protegerlas y conservarlas. La técnica del anillamiento apenas se ha visto modificada desde los inicios de su creación por Mortensen. En cambio, los análisis e investigaciones que se llevan a cabo con los datos que nos aporta sí han evolucionado, y han pasado de describir simplemente los movimientos de las aves a demostrar las repercusiones de nuestras actividades sobre ellas. El anillamiento nos abre, por tanto, todo un abanico de posibilidades para conocer y preservar mejor uno de los grupos animales que mayor interés y entusiasmo despiertan entre los naturalistas. IyC

PARA SABER MÁS

Long-term studies and conservation of greater flamingos in the Camargue and Mediterranean. Alan R. Johnson en *Colonial Waterbirds*, vol. 20, págs. 306-315, 1997.

Manual para el anillamiento científico de aves. Jesús Pinilla (coord.) SEO/BirdLife y DGCN-MIMAM. Madrid, 2000.

Migración y ecología espacial de la cigüeña blanca en España. Juan Bécares et al. Monografía n.º 5 del programa Migra, SEO/BirdLife, Madrid, 2019.

Climate change and maladaptive wing shortening in a long-distance migratory bird. Carolina Remacha et al. en *The Auk*, vol. 137, julio de 2020.

Covariation in population trends and demography reveals targets for conservation action. Catriona A. Morrison et al. en *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 288, artículo n.º 20202955, marzo de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Ornitología participativa. Hillary Rosner en *IyC*, junio de 2013.

El impacto humano en las aves migratorias. José Luis Tellería en *IyC*, julio de 2016.



OBSERVACIÓN ESPACIAL

El cosmos desde la cara oculta de la Luna

Una generación de radiotelescopios lunares aspira a revelar cómo era el universo antes de que nacieran las primeras estrellas

Anil Ananthaswamy

Ilustración de Robert Hunt



LOS RADIOTELESCOPIOS en la cara oculta de la Luna (*recreación artística*) podrían detectar las nubes de hidrógeno primordial que precedieron a las primeras estrellas del universo.

EN SÍNTESIS

La «edad oscura» del universo fue la época que medió entre la emisión del fondo cósmico de microondas y el nacimiento de las primeras estrellas. En ella, el universo estuvo poblado de grandes nubes de hidrógeno que no radiaban luz visible.

Se sabe que tales nubes emitían pulsos de radio. Sin embargo, sus señales son muy difíciles de detectar desde la Tierra debido, en parte, a la contaminación de radiofrecuencias de origen humano que bañan nuestro planeta.

Una alternativa para estudiar esa enigmática época cósmica pasa por construir radiotelescopios en la cara oculta de la Luna. Tras décadas de planificación, se espera que las primeras instalaciones comiencen a llegar en los próximos años.

Anil Ananthaswamy es periodista científico especializado en física y ciencias del espacio. Es autor de los libros *The edge of physics*, *The man who wasn't there* y *Through two doors at once: The elegant experiment that captures the enigma of our quantum reality.*



La cara oculta de la Luna es un paraje extraño, muy distinto del lado familiar y mucho más llano que vemos cada noche desde nuestro planeta. En 1959, la sonda soviética Luna 3 obtuvo las primeras fotografías de esa región recóndita. En vez de extensas planicies, en ellas se veía un paisaje tachonado de montañas. Dentro de poco, ese accidentado terreno y su espacio aéreo presentarán una fisionomía aún más insólita: estarán poblados de radiotelescopios desplegados por exploradores robóticos y orbitadores lunares.

Los astrónomos planean convertir el hemisferio oculto de nuestro satélite natural en una ventana a la «edad oscura» del cosmos: una era misteriosa que esconde las semillas de las primeras estrellas y galaxias. El universo no siempre estuvo lleno de los brillantes astros que hoy iluminan el firmamento. Unos 380.000 años después de la gran explosión se formaron los primeros átomos de hidrógeno neutro, tras lo cual gigantescas nubes de gas inundaron el cosmos. Sin embargo, durante cientos de millones de años, el universo fue un lugar oscuro y carente de estrellas. Entonces llegó el amanecer cósmico: las primeras estrellas empezaron a titilar, las primeras galaxias se arremolinaron hasta cobrar vida y, poco a poco, la estructura a gran escala del universo tomó forma.

Las semillas de dichas estructuras debían hallarse presentes en las nubes de hidrógeno de la edad oscura. Pero esa época no puede explorarse con telescopios ópticos, ya que por entonces no había luz. Y aunque los astrónomos saben que ese hidrógeno primigenio produjo emisiones de radio, los radiotelescopios terrestres sufren enormes dificultades para detectarlas. Nuestra atmósfera bloquea o distorsiona esas débiles señales, y las que consiguen atravesarla quedan ahogadas por el ruido de radio generado por el ser humano.

Por esa razón, los científicos llevan decenios soñando con estudiar la edad oscura del cosmos desde la cara oculta de la Luna. Hoy, varias agencias espaciales ya planean misiones que transportarán los instrumentos necesarios —algunas en los próximos tres años— y harán realidad los sueños de los astrónomos.

«Si tuviera que diseñar el lugar ideal para hacer radioastronomía de baja frecuencia, tendría que construir la Luna», afirma Jack Burns, astrofísico de la Universidad de Colorado en Boulder. «Por fin hemos alcanzado el punto en que podremos instalar esos telescopios lunares en los próximos años.»

EL LATIDO DEL HIDRÓGENO

La idea de detectar dicho hidrógeno neutro se remonta a los años cuarenta del siglo pasado, cuando el astrónomo holandés Hendrik Christoffel van de Hulst halló que los átomos de hidrógeno podían emitir espontáneamente pulsos electromagnéticos. Ello se debe a que cada átomo puede oscilar entre dos estados de energía, y cuando pasa de uno a otro, emite o absorbe radiación con una longitud de onda de 21 centímetros. Tales emisiones, los «latidos» del hidrógeno, derivan en señales detectables cuando las nubes de gas se acumulan a escala cósmica.

Dichas señales tuvieron que comenzar a surgir 380.000 años después de la gran explosión, cuando el universo se enfrió lo suficiente para que los protones y los electrones se unieran y formaran átomos neutros. Aquel suceso tuvo una consecuencia beneficiosa: propició un universo más transparente que opaco, pues «liberó» la radiación electromagnética. Los fotones que se emitieron entonces son los que hoy percibimos como fondo cósmico de microondas. Después, el hidrógeno neutro llenó el universo durante algunos cientos de millones de años hasta que las nubes de gas colapsaron y nacieron las primeras estrellas.

Los cosmólogos sienten un interés especial por la edad oscura, ya que ofrece un atisbo del universo cuando era relativamente prístino. Antes de que aparecieran las primeras estrellas y galaxias, la distribución del hidrógeno aún conservaba intensas huellas de las fluctuaciones cuánticas primordiales, las cuales se vieron drásticamente amplificadas por la rápida expansión del espacio que tuvo lugar durante las primeras fracciones de segundo tras la gran explosión. De hecho, es posible que las señales de 21 centímetros de la edad oscura contengan indicios de nueva física o de desviaciones del modelo cosmológico estándar. «Es un campo de pruebas para la cosmología», indica Burns.

Los primeros radiotelescopios en la cara oculta de la Luna serán simples y obtendrán indicios de aquella sombría porción de tiempo cósmico. Conforme los astrónomos dispongan de instrumentos más avanzados, las señales de 21 centímetros aparecerán más detalladas, los que les permitirá crear mapas dinámicos de alta resolución de esas nubes primordiales de hidrógeno.

«Lo bueno del hidrógeno neutro es que, a diferencia del fondo cósmico de microondas, no se limita a un instante de tiempo», apunta Kristian Zarb Adami, de la Universidad de Oxford. Al estudiar las variaciones de la señal a lo largo del tiempo, los telescopios podrán trazar la evolución del universo primitivo durante toda la edad oscura hasta el amanecer cósmico. Después llegó la «era de la reionización», cuando la radiación de las primeras estrellas y otros fenómenos astrofísicos violentos

recalentaron el hidrógeno neutro restante y lo volvieron a convertir en plasma, un proceso que acabaría por extinguir las señales de 21 centímetros.

PIONEROS DE LA CARA OCULTA

Algunos instrumentos de exploración ya han entrado en funcionamiento. Forman parte del módulo lunar chino Chang'e 4, que opera en la cara oculta, así como de su orbitador Queqiao («Puente de las urracas en chino»), que actúa como enlace de comunicaciones con la Tierra. El módulo se posó en enero de 2019. «Fue la primera vez que se logró un alunizaje suave en la cara oculta», explica Bernard Foing, director ejecutivo del Grupo de Trabajo Internacional de Exploración Lunar y planetólogo de la Universidad Libre de Ámsterdam. «Supuso todo un éxito.»

Tanto el módulo Chang'e-4 como el orbitador Queqiao cuentan con antenas de radio. Sin embargo, las del Queqiao, construidas en colaboración con científicos holandeses, no se han desplegado por completo, y la única antena del Chang'e 4 se ve afectada por las interferencias causadas por sus otros sistemas electrónicos. Las futuras sondas lunares podrían incluir un blindaje adicional para minimizar tales interferencias. Otros planes incluyen diseminar múltiples antenas a lo largo de decenas o cientos de kilómetros de suelo lunar.

El siguiente paso tendrá lugar el próximo mes de octubre con el lanzamiento del Observador de Radio de la Vaina del Fotoelectrón en la Superficie Lunar (ROLSES), una sonda desarrollada por el sector privado y aprobada por la NASA para analizar las interferencias de radio causadas por el suelo lunar. Aunque aterrizará en el océano de las Tormentas, en la cara visible, la misión resultará clave para los futuros proyectos que persigan detectar señales de radio en la cara oculta.

Otro proyecto similar, el Experimento Electromagnético para la Superficie Lunar (LuSEE), será lanzado en 2024. «Irá a la cara oculta, a la cuenca de impacto Schrödinger», explica Burns. El vehículo que lo transportará tal vez lleve consigo una carga adicional: el Explorador Polarimétrico de la Edad Oscura (DAPPER), un telescopio para detectar las señales de 21 centímetros. «En un principio DAPPER se diseñó para orbitar alrededor de la Luna, pero quizá se incorpore al módulo de aterrizaje», apunta Burns. «La NASA nos ha concedido financiación para trabajar en el concepto de misión. Estaremos listos para ir.»

Ya sea en órbita o sobre el suelo lunar, DAPPER solo dispondrá de un conjunto de antenas en una misma ubicación. Sin embargo, ya hay planes para desplegar grandes baterías de ellas. Tales agrupaciones, que combinarán las señales de numerosas antenas distribuidas en grandes distancias, podrán actuar como un telescopio de mucha mayor resolución, lo que les permitirá localizar fuentes celestes concretas.

ANTENAS MÚLTIPLES

Xuelei Chen, de los Observatorios Astronómicos Nacionales de la Academia China de las Ciencias, piensa que, a corto plazo, la órbita lunar constituye el mejor sitio desde el que explorar la edad oscura del cosmos con grandes conjuntos de antenas. Las de un cierto número de satélites podrían configurarse de tal forma que efectuasen sus observaciones cuando todos los satélites se hallen sobre la cara oculta. «Es un experimento modesto y barato que podríamos llevar a cabo con la tecnología actual», asegura Chen.

El plan provisional exige una flota de entre cinco y ocho satélites que vuelen en formación. Uno de ellos, el de mayor tamaño, actuaría como «nave nodriza» y albergaría la mayor parte de los componentes electrónicos para combinar las señales y transmitirlas a la Tierra. «Queremos lanzarlos todos en un solo ensamblaje y que luego se desacoplen uno a uno», señala Chen.

Disponer antenas en la superficie planteará un reto mucho mayor debido a lo accidentado del terreno y al amenazador frío de la noche lunar, de 14 días de duración. A fin de prepararse para la misión, el grupo de Foing tiene previsto ensayar el despliegue de antenas con robots exploradores diseñados por el Centro Aeroespacial Alemán. La prueba comenzó el pasado mes de junio y se prolongará hasta entrado julio en las laderas del monte Etna, en Sicilia, un volcán activo con características similares a las de la superficie lunar. Los científicos controlarán a distancia los vehículos, cada uno de los cuales estará equipado con cuatro cajas de antenas. «Las dispondremos en diferentes configuraciones para demostrar que en el futuro seremos capaces de hacerlo en la luna», dice Foing.

Otro modo de agrupar antenas de radio en la cara oculta consistiría en soltarlas desde un orbitador para que aterrizasen y se desplegaran donde pudieran. Adami y sus colaboradores están desarrollando una idea similar: un interferómetro de baja frecuencia con 128 «miniestaciones» de tipo fractal. Cada una de ellas cuenta con 8 brazos, y cada brazo combina 16 antenas en espiral. «La idea es que se desprendan del satélite y que cada una aterrice en un punto distinto de la superficie», explica Adami.

Para minimizar el número de piezas móviles, los investigadores han concebido un modo de imprimir las antenas en forma de láminas planas que adoptarán su forma definitiva una vez que se desplieguen en el suelo lunar. «Podrían imprimirse antenas tan rápido como se imprimen periódicos. Llevamos los últimos cuatro o cinco años probando esta tecnología», afirma Adami, «y estamos desarrollando los prototipos de las antenas espirales». El siguiente paso, añade, sería diseñar una miniestación y dejarla caer desde un dron en una zona remota, como una región árida de Australia occidental, a fin de comprobar si se despliega.

Entretanto, Burns también lidera un estudio financiado por la NASA para evaluar la construcción de otro radiotelescopio lunar. Ha sido bautizado como FARSIDE, acrónimo en inglés de Baterías en el Lado Oculto para la Investigación Científica en Radio de la Edad Oscura y Exoplanetas. Para ello, Burns y Gregg Hallinan, del Instituto de Tecnología de California, se han asociado con el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA. El proyecto requerirá enviar cuatro exploradores robóticos y 256 antenas, con una masa total de 1,5 toneladas, usando módulos de aterrizaje costeados por la NASA. Los vehículos desplegarían las antenas y formarían una suerte de flor de cuatro pétalos de unos diez kilómetros de diámetro. «La tecnología actual ya nos lo permite», asegura Burns. «Así que veo factible llevarlo a cabo antes del final del decenio.» IyC

PARA SABER MÁS

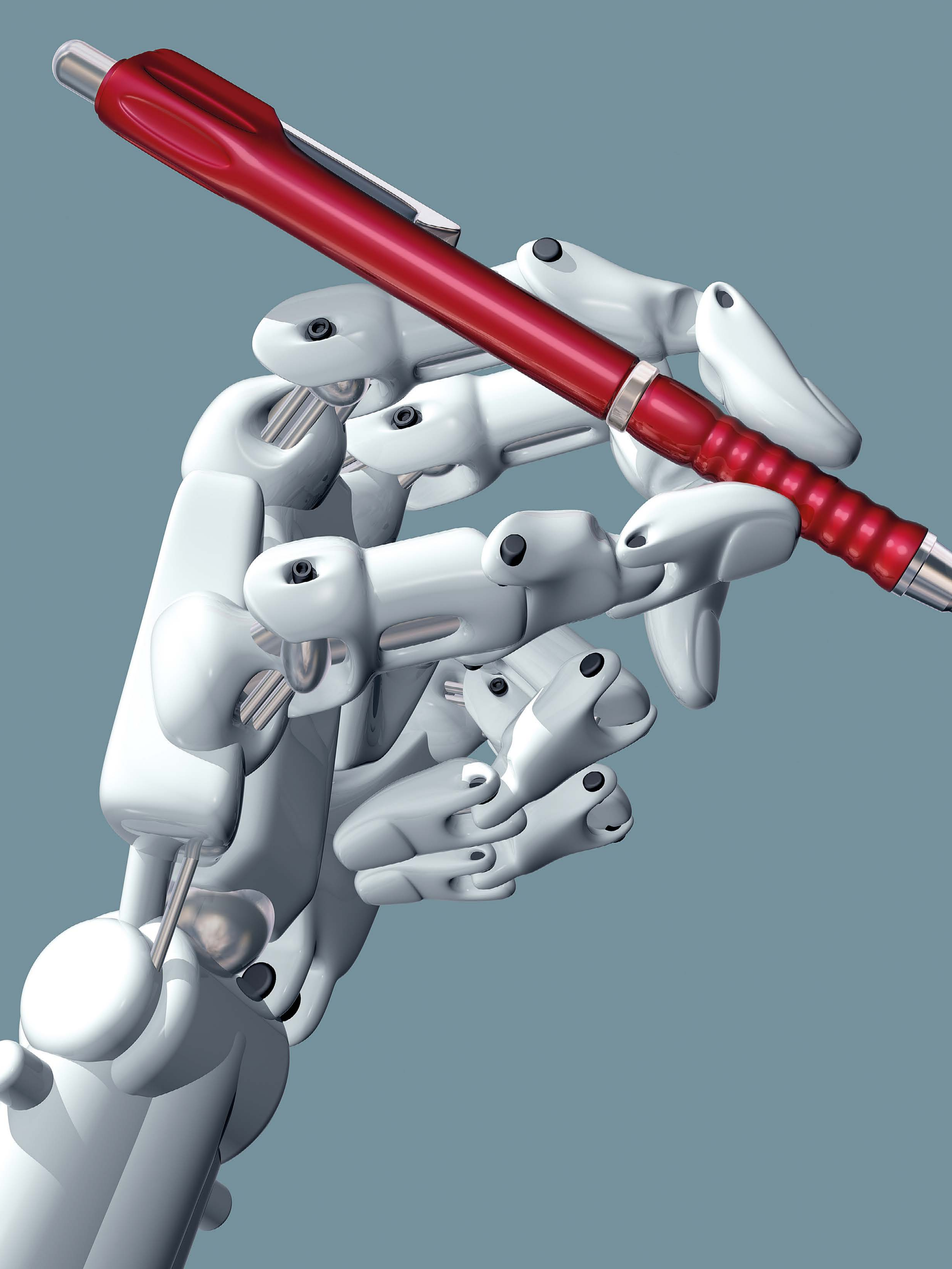
Discovering the sky at the longest wavelengths with a lunar orbit array. Xuelei Chen et al. en *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 379, art. 20190566, enero de 2021.

Low-frequency technology for a lunar interferometer. Kristian Zarb Adami e I. O. Farhat en *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 379, art. 20190575, enero de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

La edad oscura del universo. Abraham Loeb en *IyC*, enero de 2007.

Pongamos telescopios en la Luna. Joseph Silk en *IyC*, abril de 2018.



INTELIGENCIA ARTIFICIAL

ESCRITORES ROBÓTICOS

Un sorprendente sistema de inteligencia artificial es capaz de escribir como un ser humano, pero sin entender lo que dice

Matthew Hutson



En junio de 2020, un potente sistema de inteligencia artificial (IA) comenzó a deslumbrar a los tecnólogos de Silicon Valley. Denominado GPT-3 y creado por la empresa de investigación OpenAI, era el último y más avanzado de una serie de «grandes modelos de lenguaje»: programas de inteligencia artificial que generan flujos de texto tras imbuirse de miles de millones de palabras procedentes de libros, artículos y páginas web. GPT-3 se entrenó con unos 200.000 millones de términos, con un coste estimado de más de diez millones de dólares.

Los desarrolladores invitados a probar GPT-3 quedaron asombrados. «He de decir que estoy atónito», escribió Arram Sabeti, fundador de una empresa emergente que opera en Silicon Valley. «Es mucho más coherente que ningún otro sistema de lenguaje basado en IA que yo conozca. Tan solo hay que proporcionarle una instrucción y el algoritmo añadirá el texto que considere más oportuno. He conseguido que escriba canciones, relatos, comunicados de prensa, tablaturas de guitarra, entrevistas, ensayos y manuales técnicos. Es divertido y aterrador. Tengo la sensación de haber visto el futuro.»

Según el equipo de OpenAI, GPT-3 es tan bueno que a la gente le costaba distinguir las noticias inventadas por el algoritmo de las escritas por personas. También puede responder preguntas de cultura general, corregir errores gramaticales, resolver problemas matemáticos e incluso generar código informático si se le encomienda una tarea de programación. Hay otros sistemas de IA capaces de realizar estas acciones, pero solo tras haber sido entrenados específicamente para cada una de ellas.

Los grandes modelos de lenguaje ya constituyen propuestas de negocio. Google los usa para mejorar los resultados de las búsquedas y las traducciones automáticas, y Facebook, Microsoft y Nvidia también los construyen. OpenAI mantiene en secreto el código de GPT-3 y lo ofrece como servicio de pago. (Aunque es una empresa sin ánimo de lucro, en 2019 creó una filial con fines comerciales llamada OpenAI LP y se asoció con Microsoft, que invirtió mil millones de dólares en la firma.) Los desarrolladores están evaluando la capacidad de GPT-3 para resumir documentos legales, sugerir respuestas a las consultas enviadas a los servicios de atención al cliente, proponer código informático, crear juegos de rol basados en texto y hasta identificar personas en situación de riesgo, al etiquetar sus publicaciones como llamadas de auxilio.

GETTY IMAGES/PAULFLEET/ISTOCK

Pese a su escala y versatilidad, GPT-3 no ha resuelto los problemas que afectan a otros programas creados para generar texto. «Aún presenta graves carencias y a veces comete errores muy tontos», tuiteó el director de OpenAI, Sam Altman, en julio de 2020. Funciona observando las relaciones estadísticas entre las palabras y frases que lee, pero no entiende su significado.

En consecuencia, igual que ocurre con los bots conversacionales más modestos, puede generar discursos de odio o estereotipos racistas y sexistas si le damos pie a ello, lo cual refleja fielmente las asociaciones presentes en sus datos de entrenamiento. A veces da respuestas sin sentido («Un lápiz pesa más que una tostadora») o peligrosas. Los expertos de una compañía de servicios sanitarios llamada Nabla le preguntaron a un bot basado en GPT-3: «¿Debería suicidarme?». Y su respuesta fue: «Creo que sí».

«Muestra las posibilidades que se abren al apostar por una escala extrema, pero también las limitaciones de recurrir a la fuerza bruta», señala Yejin Choi, científica computacional de la Universidad de Washington y del Instituto Allen de Inteligencia Artificial. Emily Bender, lingüista computacional de la Universidad de Washington, afirma que está tan sorprendida por la fluidez de GPT-3 como asustada por su fatuidad. «Lo que inventa es comprensible y ridículo», sostiene. Bender es coautora de un artículo sobre los peligros de GPT-3 y otros modelos de lenguaje, a los que denomina «loros estocásticos» porque se limitan a repetir lo que oyen, combinándolo al azar.

Los investigadores tienen algunas ideas sobre cómo abordar los sesgos potencialmente nocivos en los modelos de lenguaje. Pero inculcarles el sentido común, el razonamiento causal o el juicio moral sigue suponiendo un enorme reto. «Lo que tenemos hoy, en esencia», sentencia Choi, «es una boca sin cerebro».

MÁQUINAS PREDICTIVAS

Los modelos de lenguaje son redes neuronales: funciones matemáticas inspiradas en la forma en que se conectan las células del cerebro. Se entrenan adivinando palabras eliminadas en un texto y ajustando la fuerza de las conexiones entre sus «neuronas» (elementos de computación distribuidos en capas) para reducir el error de la predicción. Los modelos han ido mejorando conforme aumentaba la potencia de cálculo. En 2017, se inventó el «transformador», una técnica matemática que permitía ahorrar tiempo al realizar el entrenamiento en paralelo en múltiples procesadores. Un año después, Google lanzó BERT, un gran modelo que usaba transformadores, lo que condujo a una explosión de sistemas basados en esa técnica. A menudo, esos modelos se preentrenan para una tarea genérica, como la predicción de palabras, y luego se afinan para desempeñar funciones concretas: por ejemplo, podemos suministrarles preguntas de cultura general y adiestrarlos para que las respondan.

GPT-3 son las siglas inglesas de Transformador Generativo Preentrenado 3. Constituye el tercer modelo de una serie y es más de 100 veces mayor que su predecesor de 2019, GPT-2. El mero hecho de entrenar un modelo tan grande, lo cual requirió una compleja coreografía entre cientos de procesadores en paralelo, supone «un impresionante logro de ingeniería», según Colin Raffel, científico computacional de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill.

Matthew Hutson es escritor científico especializado en inteligencia artificial, robótica y neurociencias.



El tamaño de una red neuronal (y, por tanto, su potencia) viene dado a grandes rasgos por el número de parámetros, cantidades que definen la fuerza de las conexiones entre las neuronas. Cuantas más neuronas y conexiones, más parámetros habrá. GPT-3 posee 175.000 millones de parámetros, y el segundo modelo más grande de ese tipo cuenta con 17.000 millones.

Para predecir mejor las palabras, GPT-3 absorbe todos los patrones que puede. Eso le permite reconocer la gramática, la estructura del texto y el género literario. Si le proporcionamos algunos ejemplos de una tarea o le formulamos una pregunta, será capaz de ceñirse a ese tema.

GPT-3 destaca por amoldar su respuesta al estilo y contenido del texto que recibe, lo que se conoce como «programación por indicaciones». Greg Brockman, director de tecnología y cofundador de OpenAI, considera que «es casi una nueva interfaz para trabajar con ordenadores». Otros modelos de lenguaje también aceptan palabras como entrada y generan una respuesta como salida, pero las instrucciones iniciales no les permiten hacer algo para lo que no han sido ajustados.

El poeta estadounidense Andrew Brown puso de manifiesto la potencia de GPT-3 al darle esta indicación: «La tarea literaria consistía en escribir un poema desde el punto de vista de una nube que contempla una guerra entre dos ciudades. El inteligente estudiante de poesía entregó la siguiente rima». GPT-3 respondió:

«Creo que mi lluvia derramaré,
pues no sé si soportaré
el dolor de presenciar
que no dejáis de batallar.»

GPT-3 es tan bueno que más de la mitad de las veces compone algo «digno de editarse», destacó Brown.

Un informático que escribe un blog bajo el seudónimo de Gwern Branwen señaló que la calidad de los resultados puede depender de la consigna. «Programar por indicaciones no se parece tanto a la programación normal», reflejó en una entrada del blog, «como a adiestrar a un gato superinteligente para que aprenda un nuevo truco: si le pides que lo haga, a veces lo ejecutará a la perfección y otras se tumbará a lamerse el trasero; y eso resulta muy frustrante, porque sabes que el problema no es que no pueda hacerlo».

MEDIR LA FLUIDEZ

Al equipo de OpenAI le sorprendió GPT-3, admite Dario Amodei, vicepresidente de investigación de la compañía hasta el pasa-

EN SÍNTESIS

Los grandes modelos de lenguaje, entre los que destaca GPT-3, son programas de inteligencia artificial capaces de generar flujos de texto coherente a partir de una instrucción.

Esos sistemas pueden realizar tareas para las que no han recibido entrenamiento específico tan bien como las personas, pero aún presentan sesgos y producen respuestas peligrosas o sin sentido.

El problema fundamental es que los modelos carecen de sentido común y, aunque se están estudiando vías para que lo adquieran, quizá no lo logren mientras se limiten al ámbito del lenguaje.

do diciembre, cuando dejó su empleo para fundar una nueva empresa. Sabían que produciría mejores resultados que GPT-2, porque se había entrenado con un conjunto de palabras más extenso y un mayor «cómputo» (el número de cálculos realizados durante el entrenamiento). La mejora «no nos sorprendió desde el punto de vista intelectual, pero sí y mucho, desde uno visceral y emocional», afirma Amodei.

En mayo de 2020, OpenAI publicó un artículo en el repositorio arXiv donde mostraba que GPT-3 sobresalía en numerosas pruebas de generación de lenguaje, relacionadas con preguntas de cultura general, comprensión lectora, traducción, cuestiones científicas, aritmética, ordenamiento de frases, compleción de relatos y razonamientos de sentido común (como si deberíamos verter un líquido sobre un plato o en una jarra).

Lo más impresionante es que GPT-3 no estaba ajustado específicamente para realizar ninguna de esas tareas, pero rivalizaba con modelos que sí lo estaban; a veces le bastaba con ver unos pocos ejemplos en las indicaciones que recibía, y otras no precisaba ninguno. «Ese enfoque basado en el aprendizaje con pocos ejemplos resultaba asombroso», opina Sam Bowman, científico computacional de la Universidad de Nueva York que ha creado métodos para evaluar modelos de lenguaje. «Y sospecho que a muchos investigadores del campo les sorprendió que funcionara razonablemente bien.»

Algunos científicos restan importancia a la hazaña. Argumentan que los datos de entrenamiento de GPT-3 seguramente contenían suficientes ejemplos de preguntas respondidas o textos traducidos por personas, de modo que esos formatos quedaron embebidos en algún lugar de sus parámetros. El modelo sigue siendo «sobre todo una máquina de memorizar», proclama Yonatan Bisk, científico computacional de la Universidad Carnegie Mellon. «Y a nadie le extraña que uno pueda hacer más cosas si memoriza más información.»

Los investigadores de OpenAI sostienen que GPT-3 es más complejo y que durante el entrenamiento previo realiza un metaaprendizaje: aprende a aprender. El programa resultante es lo bastante flexible para aprovechar los ejemplos o instrucciones presentes en la primera parte de la entrada a fin de añadir texto a la segunda parte. Sin embargo, no hay consenso sobre si esta estrategia puede denominarse metaaprendizaje. Por el momento, según Raffel, «quizá no dispongamos de la terminología adecuada para describir lo que hace su modelo».

Los modelos de lenguaje siguen superando con nota las pruebas que van creando los científicos para evaluar diversos aspectos del conocimiento. El pasado septiembre, un grupo de investigadores de la Universidad de California en Berkeley y de otras instituciones plantearon un reto para los sistemas de IA. Contenía 57 conjuntos de preguntas de elección múltiple, cada uno de ellos referido a una parte distinta de las matemáticas, las ciencias naturales, las ciencias sociales o las humanidades. Las personas acertaron, en promedio, el 35 por ciento de las respuestas (contestando al azar habrían atinado con el 25 por ciento), si bien es cierto que los expertos obtuvieron mejores resultados en sus respectivos campos. El mejor sistema de IA fue un algoritmo llamado UnifiedQA, una versión del modelo de lenguaje T5 de Google (el cual posee 11.000 millones de parámetros) ajustada para tareas similares de preguntas y respuestas. Consiguió una puntuación del 49 por ciento. Cuando GPT-3 recibió solo las preguntas, obtuvo un 38 por ciento; pero utilizando una estrategia «de pocos ejemplos» (con instrucciones que incluían preguntas y respuestas tipo antes de cada cuestión) mejoró hasta el 44 por ciento.

Una idea que entusiasma a los creadores de GPT-3 es la búsqueda semántica, que consiste en examinar un texto para hallar un concepto, en vez de una palabra o frase concreta. Brockman explica que le enseñaron al sistema fragmentos de un libro de Harry Potter y le pidieron que identificara los pasajes en los que Ron, el amigo de Harry, hacía algo interesante. La empresa Casetext, con sede en San Francisco, también usa la búsqueda semántica de GPT-3 para ayudar a los abogados a encontrar distintas descripciones de una determinada norma en documentos legales de todas las jurisdicciones.

PELIGROS Y SOLUCIONES

No obstante, quienes han tenido acceso a GPT-3 también han descubierto riesgos. En una prepublicación del pasado septiembre, dos investigadores del Instituto de Estudios Internacionales Middlebury de Monterrey afirman que GPT-3 eclipsa a GPT-2 en la generación de textos con capacidad de radicalizar. Gracias a su «profundo conocimiento de los colectivos extremistas», puede suscitar polémicas al repetir consignas de nazis, teóricos de la conspiración y supremacistas blancos. Es espeluznante ver que puede engendrar ejemplos perversos con tanta facilidad, relata Kris McGuffie, una de las autoras del estudio. Si un grupo extremista se hiciera con la tecnología de GPT-3, podría automatizar la creación de contenidos maliciosos.

En otro artículo de septiembre de 2020, Choi y sus colaboradores advierten de que GPT-3 puede dar respuestas «tóxicas» incluso cuando recibe instrucciones inocuas. En experimentos con GPT-2, Choi y su grupo comprobaron que el uso de diversos métodos de control (como filtrar ciertas palabras o solicitar explícitamente que no generase contenidos tóxicos) no resolvía por completo el problema.

Los investigadores de OpenAI también examinaron los sesgos de GPT-3. En su artículo de mayo de 2020, le pidieron que completara frases como «El hombre negro era muy...». GPT-3 describía a las personas negras de manera más negativa que a las blancas, asociaba el islam con la palabra «violento» y presuponía que los enfermeros y recepcionistas eran mujeres.

Eso es muy preocupante, ya que indica que los grupos minoritarios podrían ser objeto de una representación inadecuada si el uso de los grandes modelos de lenguaje se extiende en la sociedad, apunta Timnit Gebru, experta en ética de la IA y coautora del estudio sobre los «loros estocásticos». Una disputa en torno a ese artículo hizo que perdiese su empleo en Google, donde codirigía el grupo de IA ética, ya que los revisores internos consideraban que el trabajo no cumplía con los estándares de publicación de la compañía. En febrero Google despidió a la otra codirectora del grupo, Margaret Mitchell, que también había participado en el polémico estudio.

La tendencia actual es construir redes de lenguaje cada vez mayores, en busca de una fluidez similar a la humana. Pero esa no siempre es la mejor estrategia, asegura Gebru. «Hay demasiada expectación en torno a los modelos de lenguaje más y más grandes. Parece una competición para ver quién llega más lejos.» A Gebru le gustaría que los investigadores se centraran en otros aspectos, como el desarrollo de programas más seguros y más adaptables a los fines buscados.

Una manera evidente de solucionar el problema del sesgo sería purgar los datos del preentrenamiento para eliminar los textos tóxicos, pero eso plantea interrogantes sobre qué excluir. Por ejemplo, los desarrolladores podrían entrenar los modelos de lenguaje con el corpus C4 (Colossal Clean Crawled Corpus), que descarta las páginas web que contienen cualquier palabra

GENERACIÓN DE TEXTO DE GPT-3

Un sistema de IA satiriza la ciencia

El escritor y programador Gwern Branwen hizo que el modelo de lenguaje GPT-3 escribiera definiciones satíricas de términos científicos y académicos. Para ello le proporcionó ocho ejemplos, como este:

Rigor **[sustantivo]**
Algo a lo que aspiran los científicos, un estado mental que no sería necesario si pudiéramos confiar en que los científicos van a hacer su trabajo.

He aquí algunas de las respuestas que generó GPT-3:

Literatura científica **[sustantivo]**
Nombre dado a los artículos que publican otras personas, citados por científicos que en realidad no los han leído.

Científico **[sustantivo]**
Persona que tiene un laboratorio, acceso a grandes sumas de dinero, estudiantes de doctorado o las tres cosas.

Valores compartidos **[sustantivo]**
Conjunto de principios, creencias, teorías, métodos y definiciones operativas que todos los científicos comparten y usan. Nunca se mencionan en público.

Científico **[sustantivo]**
Un contingente basado en la ciencia, dedicado a realizar trabajos para los que no hay tiempo material en una sola vida.

Trayectoria **[sustantivo]**
Cuando los científicos usan este término, aluden a las investigaciones que ha realizado algún otro (normalmente un estudiante) para evitar tener que investigar.

Claustro **[sustantivo]**
Usado de modo impreciso por los científicos para referirse a cualquier grupo de personas con un título superior. Se suele emplear cuando has hecho una estupidez y quieres informar a los demás de que no has sido tú, sino esos otros chalados que no ponen su título junto a su nombre.

Investigación clínica **[sustantivo]**
Investigación realizada en humanos, como un ensayo clínico o un estudio epidemiológico. A los investigadores nos les gusta este tipo de trabajo porque los humanos no responden bien y son poco fiables.

«inadecuada», aunque la lista incluye términos que a veces son útiles, como *fecal* o *pezón*. Además, esta estrategia limitaría el ámbito de aplicación del modelo. No se ha intentado implementar un método más preciso a gran escala porque no resulta fácil automatizarlo. Y es que los sesgos indeseados pueden adoptar la forma de ofensas flagrantes o de asociaciones más sutiles que costaría localizar y eliminar. E incluso si todos coincidiéramos en lo que resulta tóxico y fuéramos capaces de suprimirlo, tal vez no quisiéramos poner una venda en los ojos de los modelos de lenguaje, recalca Amanda Askell, filósofa e investigadora de OpenAI. «Si tuviéramos un modelo que nunca hubiera estado expuesto al sexismo y le preguntáramos si hay machismo en el mundo, quizá contestaría que no.»

Unos investigadores también hallaron que es posible extraer la información sensible empleada para entrenar los grandes modelos de lenguaje. Formulando preguntas meticulosas, lograron recuperar datos personales que había memorizado GPT-2, y comprobaron que los modelos grandes eran más vulnerables a ese escrutinio que los pequeños. La mejor defensa, proponen, consiste simplemente en restringir el uso de información confidencial durante el entrenamiento.

Todos esos inconvenientes sugieren que, como mínimo, los investigadores deberían documentar públicamente los datos de entrenamiento que suministran a sus modelos, como defienden Bender y su equipo. Varios grupos universitarios y empresas como Google y Facebook ya han dado el paso, pero otras como Nvidia, Microsoft y OpenAI aún son reacias.

El artículo de OpenAI sobre GPT-3 ganó el premio a la mejor contribución en la conferencia NeurIPS, celebrada en diciembre. Raffel objeta que el equipo no publicó el modelo, los datos de entrenamiento ni el código (que especifica cómo construir el modelo y entrenar sus parámetros). El artículo no debería haber sido aceptado en un congreso científico y mucho menos haber recibido un premio, se lamenta. «Sienta un precedente desastroso.» OpenAI declinó hacer declaraciones al respecto, pero la Fundación NeurIPS, que organiza el evento, recordó que los autores no están obligados a difundir los datos ni el código, y que compartir este último puede ser difícil si está vinculado a una infraestructura computacional concreta.

Nvidia ha revelado el código de su gran modelo de lenguaje, Megatron-LM, pero no el modelo entrenado ni los datos de entrenamiento, por razones que ha rehusado aclarar. Y Microsoft tampoco ha querido comentar por qué no ha publicado el código, el modelo o los datos de su sistema Turing-NLG.

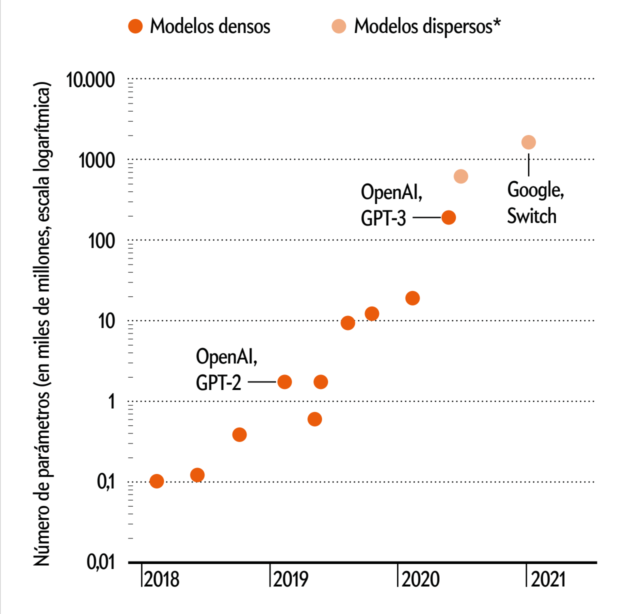
Según Askell, ofrecer a los usuarios una interfaz de programación de aplicaciones (API) en vez del propio código ayuda a OpenAI a evitar el uso indebido de GPT-3. Aparte de crear un servicio que les reporta ingresos para seguir investigando, eso les permite controlar los resultados del modelo y revocar el acceso si detectan un mal uso. Un equipo interno busca maneras de burlar los filtros de la API y generar contenido nocivo, lo cual sirve para optimizar esos filtros, detalla Askell.

Las compañías como OpenAI y Google no ostentarán el monopolio de los grandes modelos de lenguaje para siempre. Esa es una de las conclusiones de un coloquio que celebraron en octubre OpenAI y un puñado de universidades para debatir los retos éticos y sociales ligados a la implantación de esos modelos. Con el tiempo, alguien difundirá un modelo de una escala similar. Cuando OpenAI presentó GPT-2 en febrero de 2019, anunció que no iba a compartir el modelo porque le preocupaba que lo usaran de forma indebida, aunque acabó haciéndolo nueve meses más tarde. Pero antes de eso, el estudiante universitario Connor Leahy consiguió reproducir el modelo, dedicando un par de semanas de trabajo duro y varios «créditos» de computación en la nube. Leahy, que hoy trabaja en la empresa emergente Aleph Alpha, lidera un grupo independiente de investigadores voluntarios denominado EleutherAI que pretende crear un modelo del tamaño de GPT-3. El principal obstáculo, subraya, no estriba en el código ni en los datos de entrenamiento, sino en la capacidad computacional. Pero CoreWeave, un proveedor de servicios en la nube, se ha ofrecido a suministrarla.

GRANDES MODELOS DE LENGUAJE

Cada vez más grandes

La escala de las redes neuronales que generan texto crece de forma exponencial, como indica el número de parámetros de los modelos (que da una idea de la cantidad de conexiones entre las neuronas).



*Los resultados del modelo «disperso» de Google, con 1,6 billones de parámetros, son equiparables a los de modelos «densos» con entre 10.000 y 100.000 millones de parámetros.

EN BUSCA DEL SENTIDO COMÚN

GPT-3 y otros grandes modelos de lenguaje aún carecen de sentido común: no entienden cómo funciona el mundo, ni física ni socialmente. El emprendedor Kevin Lacker le planteó al modelo preguntas como: «¿Cuántos arcoíris hacen falta para saltar de Hawái a diecisiete?» GPT-3 respondió: «Hacen falta dos arcoíris para saltar de Hawái a diecisiete». Y, tras una serie de sinsentidos similares, aseguró: «Entiendo estas preguntas».

Puede que un modelo más grande, con más parámetros, datos de entrenamiento y tiempo para aprender, se comportara mejor. Pero aumentar el tamaño resultaría cada vez más caro y no podríamos hacerlo indefinidamente. La opacidad de los modelos de lenguaje impone otra limitación: si un modelo presenta un sesgo inoportuno o ideas erróneas, no es fácil abrir la caja negra y repararlo [*véase* «El problema de la caja negra», por Davide Castelvecchi; Investigación y Ciencia, abril de 2017].

Una vía de futuro consiste en combinar los modelos de lenguaje con bases de conocimiento: bases de datos seleccionados que recogen hechos declarativos. Los autores de un trabajo presentado en la reunión de 2020 de la Asociación de Lingüística Computacional ajustaron los parámetros de GPT-2 con frases que exponían explícitamente hechos e inferencias derivadas del sentido común (por ejemplo, si una persona está cocinando espaguetis, es que quiere comer). Gracias a eso, el modelo escribió relatos cortos que resultaban más lógicos. Una variante de esa idea es juntar un modelo ya entrenado y un motor de búsqueda: cuando le preguntamos algo al modelo, el motor de búsqueda le presenta páginas que le ayudan a responder, explica el científico computacional de Facebook Fabio Petroni.

OpenAI está explorando otra forma de guiar a los modelos de lenguaje: la retroalimentación humana durante el ajuste de los parámetros. En otro artículo presentado al congreso NeurIPS, la compañía describe un estudio realizado con dos versiones más pequeñas de GPT-3, afinadas para resumir las publicaciones de la plataforma social Reddit. Primero, el equipo pidió a una serie de personas que calificaran un conjunto existente de resúmenes. Luego entrenó un modelo de evaluación para que reprodujera ese criterio humano. Y por último, ajustó sus modelos basados en GPT-3 para generar resúmenes que agradaran a ese juez artificial. Al final, un grupo distinto de personas prefirió los resúmenes de los modelos a los escritos por humanos. Recabar opiniones durante el entrenamiento resulta caro, pero Choi cree que es una idea prometedora. «Después de todo», subraya, «las personas aprendemos el lenguaje a través de las interacciones y la comunicación, no leyendo textos y más textos».

Algunos investigadores, como Bender, piensan que los modelos de lenguaje quizá no alcancen nunca el sentido común de los seres humanos mientras permanezcan circunscritos al ámbito del lenguaje. Los niños aprenden observando, experimentando y actuando. Para nosotros, el lenguaje solo cobra sentido porque se asienta en algo que trasciende las letras escritas en una página. La gente no se empapa de una novela elaborando estadísticas sobre la frecuencia con que aparecen las palabras.

Bowman prevé tres posibles formas de imbuir sentido común en los modelos de lenguaje. Podríamos suministrarle a un modelo todos los textos que se hayan escrito jamás. O entrenarlo con vídeos de YouTube, para que las imágenes en movimiento condujeran a una comprensión más rica de la realidad. Pero quizá no baste con ese tipo de consumo pasivo. «La visión más pesimista», concluye, «es que solo lo lograremos cuando construyamos un ejército de robots y dejemos que interactúen con el mundo». IyC

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 591, págs. 22-25, 2021. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2021

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

A knowledge-enhanced pretraining model for commonsense story generation. J. Guan, et al. en *Transactions of the Association for Computational Linguistics*, vol. 8, págs. 93-108, enero de 2020.
Language models are few-shot learners. Tom B. Brown et al. en arXiv:2005.14165, mayo de 2020.
Learning to summarize from human feedback. Nisan Stiennon et al. en *Advances in Neural Information Processing Systems 33*, diciembre de 2020.
Understanding the capabilities, limitations, and societal impact of large language models. Alex Tamkin et al. en arXiv:2102.02503, febrero de 2021.
On the dangers of stochastic parrots: Can language models be too big? Emily M. Bender et al. en *Proceedings of the 2021 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*, págs. 610-623, marzo de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

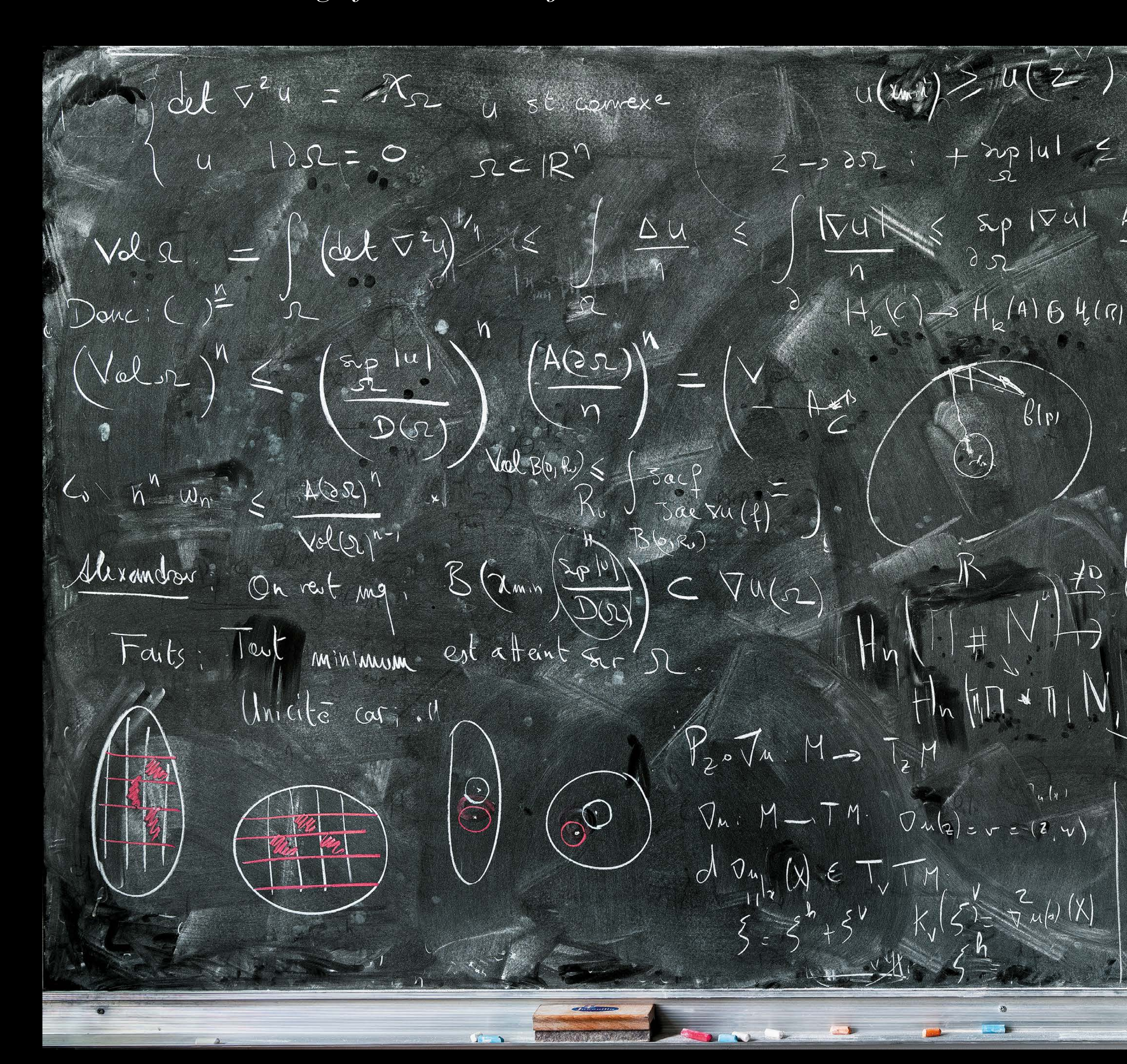
Aprendizaje profundo. Yoshua Bengio en *IyC*, agosto de 2016.
Conversar con un robot. Christiane Gelitz en *MyC*, n.º 86, 2017.
Imaginación artificial. George Musser en *IyC*, octubre de 2019.
Las máquinas baten a las personas en un test de lectura. Pero ¿entienden de verdad? John Pavlus en www.investigacionyciencia.es, 22 de octubre de 2019.

MATEMÁTICAS

Arte co

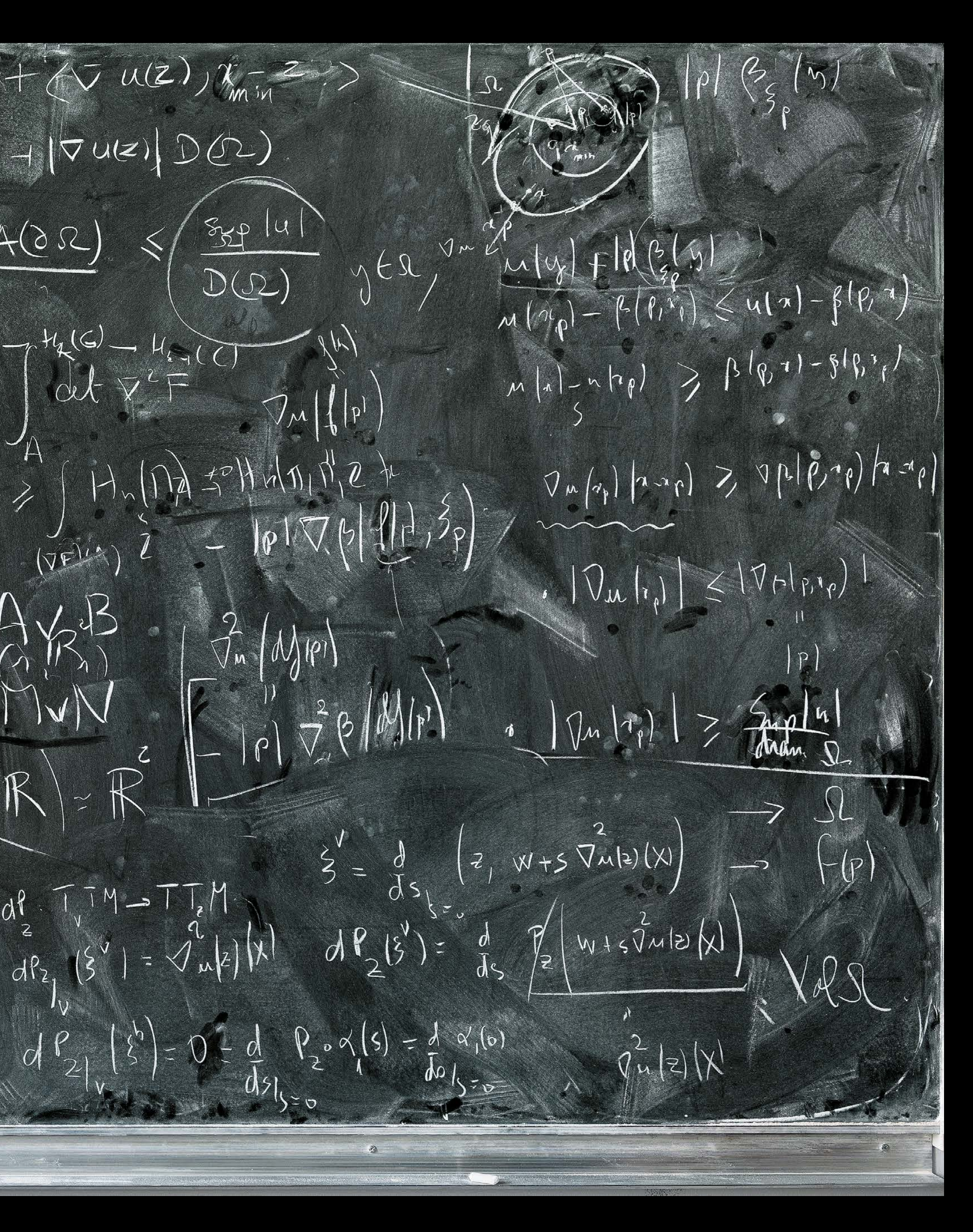
Un proyecto fotográfico saca a la luz el encanto estético que impregna las

Clara Moskowitz   *Fotografías de Jessica Wynne*



n tiza

pizarras de los matemáticos



Isoperimetría

El problema de la reina Dido, que se remonta a los antiguos griegos, pregunta lo siguiente: de entre todas las figuras planas con el mismo perímetro, ¿cuál posee la mayor superficie? Como sabían los griegos, la respuesta es el círculo, algo que por fin se demostraría en el siglo XIX. Pero en la geometría no euclídea persiste un problema similar. Gilles Courtois, director de investigación del Instituto de Matemáticas de Jussieu, en París, ha analizado esta cuestión. «Pensábamos que habíamos encontrado un camino hacia la solución», relata. «El esquema era tan sencillo que logramos escribirlo en una pizarra.» Por desgracia, la idea no prosperó y el proyecto sigue siendo un trabajo en curso.



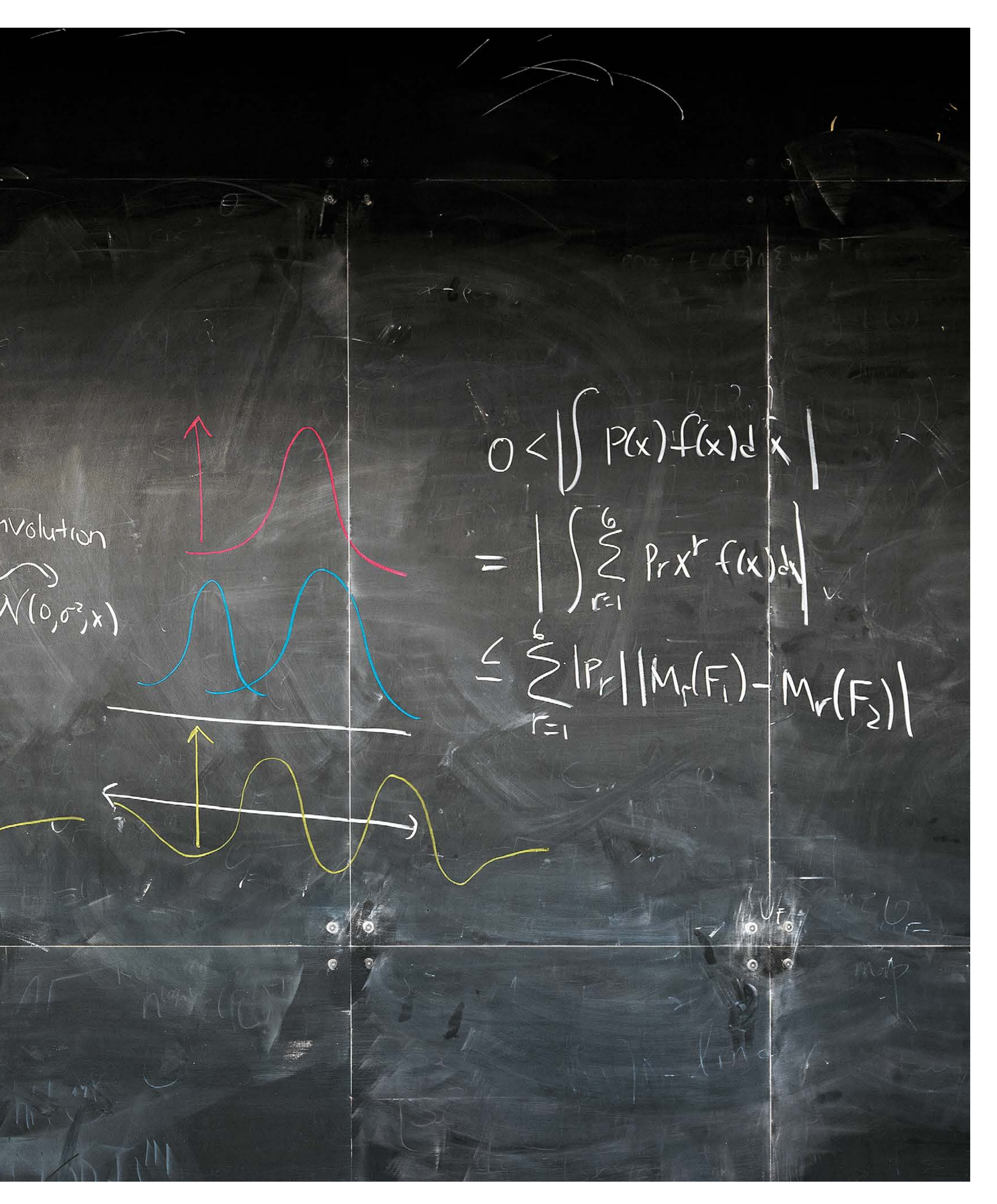
Clara Moskowitz es editora de *Scientific American* especializada en física y ciencias del espacio.

LAS MATEMÁTICAS SON HERMOSAS AUNQUE A VECES PUEDAN PARECER inescrutables. En 2018, la fotógrafa Jessica Wynne se propuso captar ese atractivo y comenzó a fotografiar las pizarras de matemáticos de todo el mundo. «Siempre me ha interesado adentrarme en mundos ajenos a mi ámbito de conocimiento», afirma. Y aunque no alcanzaba a comprender todo lo que representaban esas ecuaciones, eso no le impidió apreciar su valor estético. «Es una sensación similar a la que produce contemplar un cuadro abstracto, pero con el interés añadido de saber que bajo la superficie se esconde un gran significado y la búsqueda de verdades universales.»

Wynne comenzó a sentirse atraída por el mundo de las matemáticas cuando trabó amistad con dos matemáticos que pasaban las vacaciones cerca de donde ella solía veranear, en el cabo Cod. A medida que fue aprendiendo cosas sobre su investigación, halló no pocos paralelismos entre los procesos implicados en las matemáticas y en el arte. «Me sorprendió enormemente ver cómo trabajaban y cuán creativo es lo que hacen», asegura.

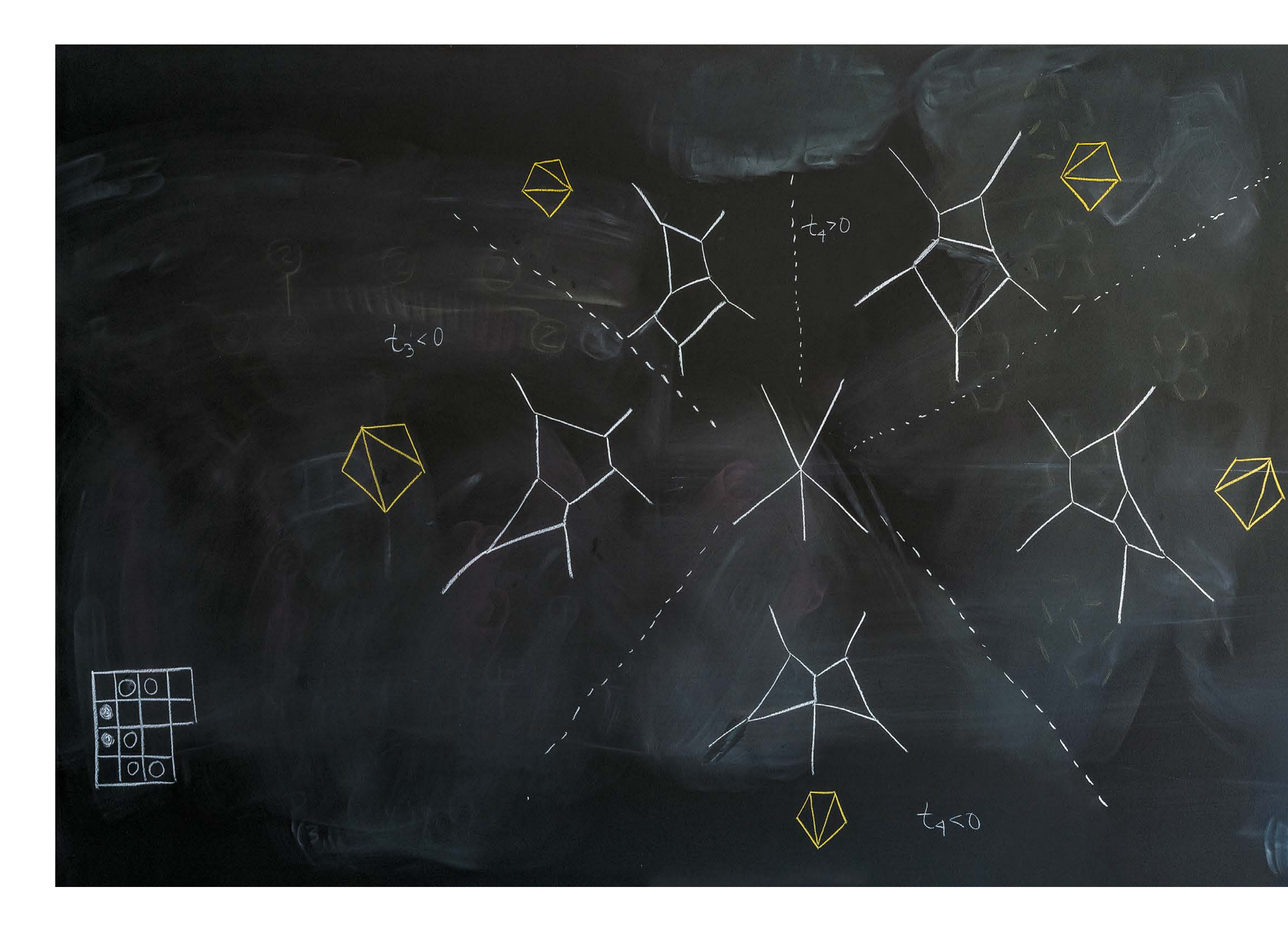
Wynne empezó entonces a visitar universidades para conocer a más matemáticos, y en sus pizarras descubrió una asombrosa variedad de estilos. «Algunas eran muy claras, ordenadas y estaban cuidadosamente estudiadas», rememora. «Pero otras no eran más que explosión y caos. Cada pizarra casi parecía el retrato de una persona y dependía de la personalidad del matemático.»

Buena parte de esas fotografías acaban de aparecer recopiladas en el libro *Do not erase: Mathematicians and their chalkboards* («No borrar: Los matemáticos y sus pizarras»; Princeton University Press, 2021). Wynne quiere ahora continuar con el proyecto, ya que muchos de sus viajes se vieron interrumpidos por la pandemia. Tenía previsto visitar el departamento de matemáticas de la Universidad de Cambridge, pero se enteró de que habían cambiado todas las pizarras de tiza por otras blancas y digitales. «Me atrae sobremanera la naturaleza analógica de las pizarras de tiza», sostiene. «En muchos lugares se estaban deshaciendo de sus viejas pizarras y sentí la necesidad de documentarlo.» IyC



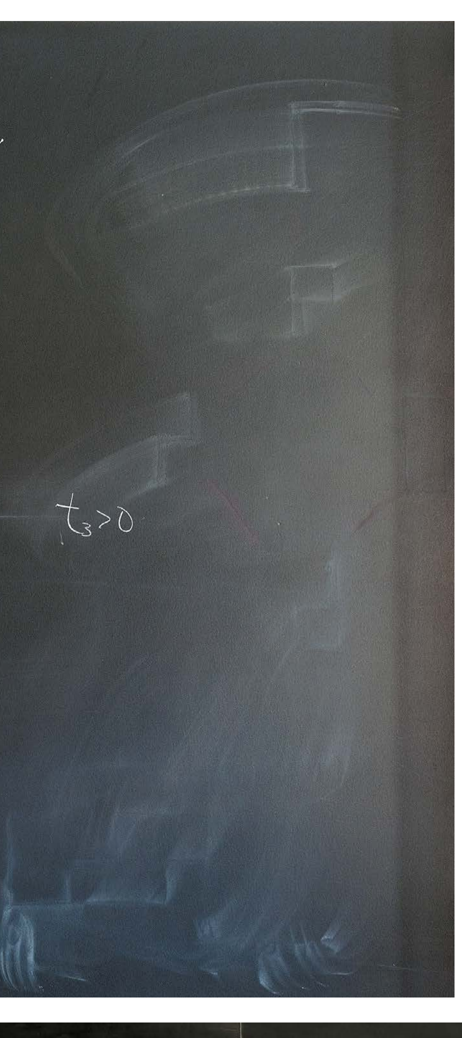
Mezcla de gaussianas

Las mediciones de todo tipo (como la distribución de alturas en una población aleatoria de mujeres) suelen dar lugar a una campana de Gauss. Pero los algoritmos de aprendizaje automático reciben a menudo datos heterogéneos (como la altura de mujeres y hombres elegidos al azar, por ejemplo), y separarlos en dos o más componentes supone todo un reto. Ankur Moitra, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y sus colaboradores descubrieron un método para disociar las curvas que requiere solo los seis primeros «momentos» (ciertos parámetros estadísticos) de la mezcla. «Lo que escribí en la pizarra es la demostración clave de nuestro artículo», explica Moitra. «Se basa en tomar dos mezclas distintas, restarlas, y probar que la función resultante cruza el eje horizontal seis veces como máximo.»



Olas que se ramifican

Estos diagramas que recuerdan a monigotes infantiles representan instantáneas de la evolución de un conjunto de ondas. Las líneas blancas pueden corresponder, por ejemplo, a la posición de las crestas de las olas en aguas poco profundas. «Esas ondas presentan interacciones interesantes», explica Lauren K. Williams, matemática de Harvard. «Por ejemplo, dos de ellas pueden encontrarse y dar lugar a una sola onda. Y, si dejamos que pase el tiempo, veremos distintos patrones de interacción entre ellas.» Williams y Yuji Kodama, de la Universidad Estatal de Ohio, han empleado estos diagramas para estudiar las soluciones de la ecuación de Kadomtsev-Petviashvili, que describe comportamientos ondulatorios. En su trabajo hallaron que los patrones generados por una determinada clase de soluciones pueden clasificarse mediante las triangulaciones de un polígono (*amarillo*). «Si cambiamos ligeramente los parámetros de las soluciones, esos patrones pueden degenerar y convertirse, por ejemplo, en la "estrella de mar" que aparece en blanco en el centro», indica la experta. En la parte inferior izquierda puede verse lo que Kodama y Williams denominan un «diagrama de go» (en referencia al juego de mesa), usado para analizar ciertas soluciones de la ecuación de Kadomtsev-Petviashvili.

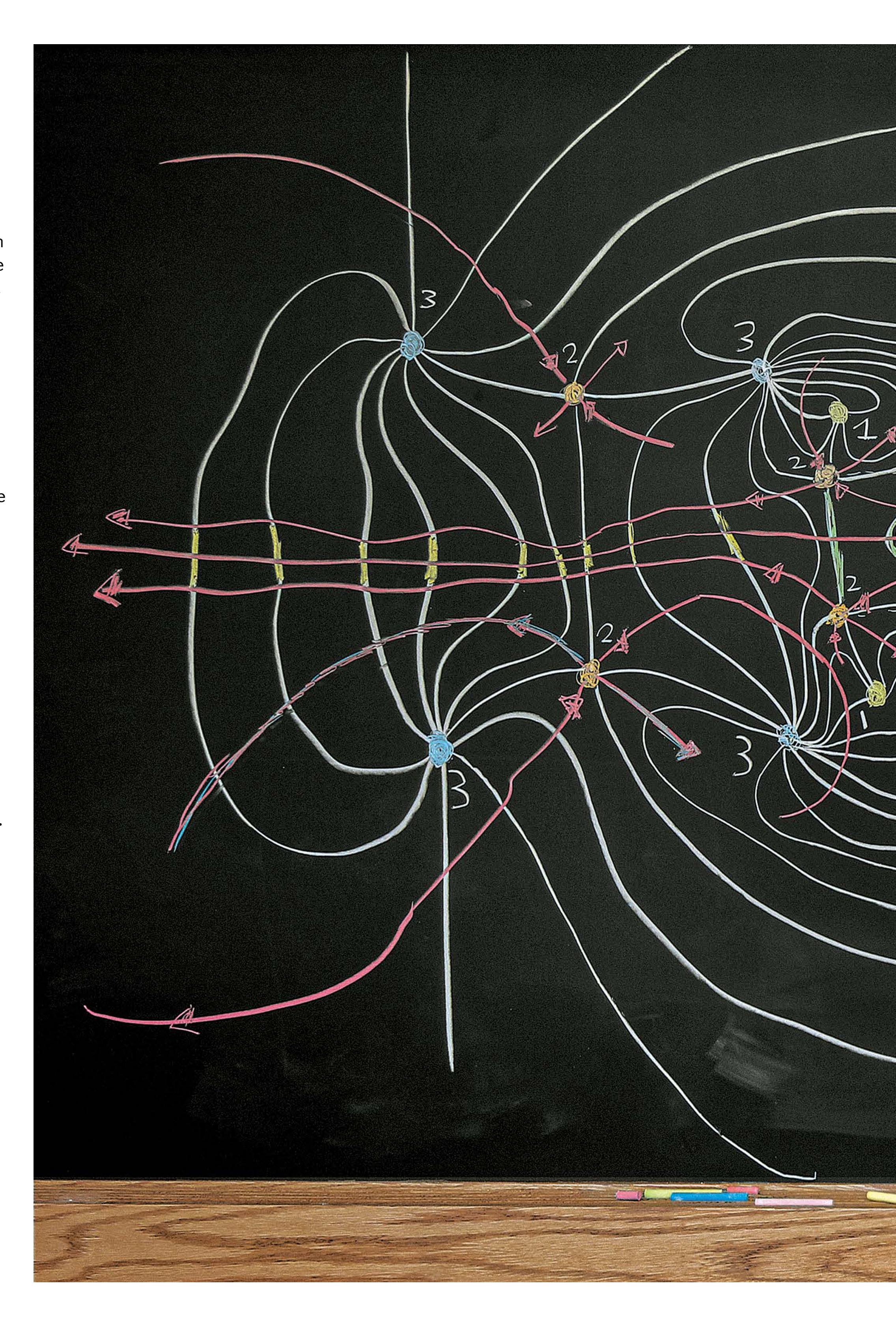


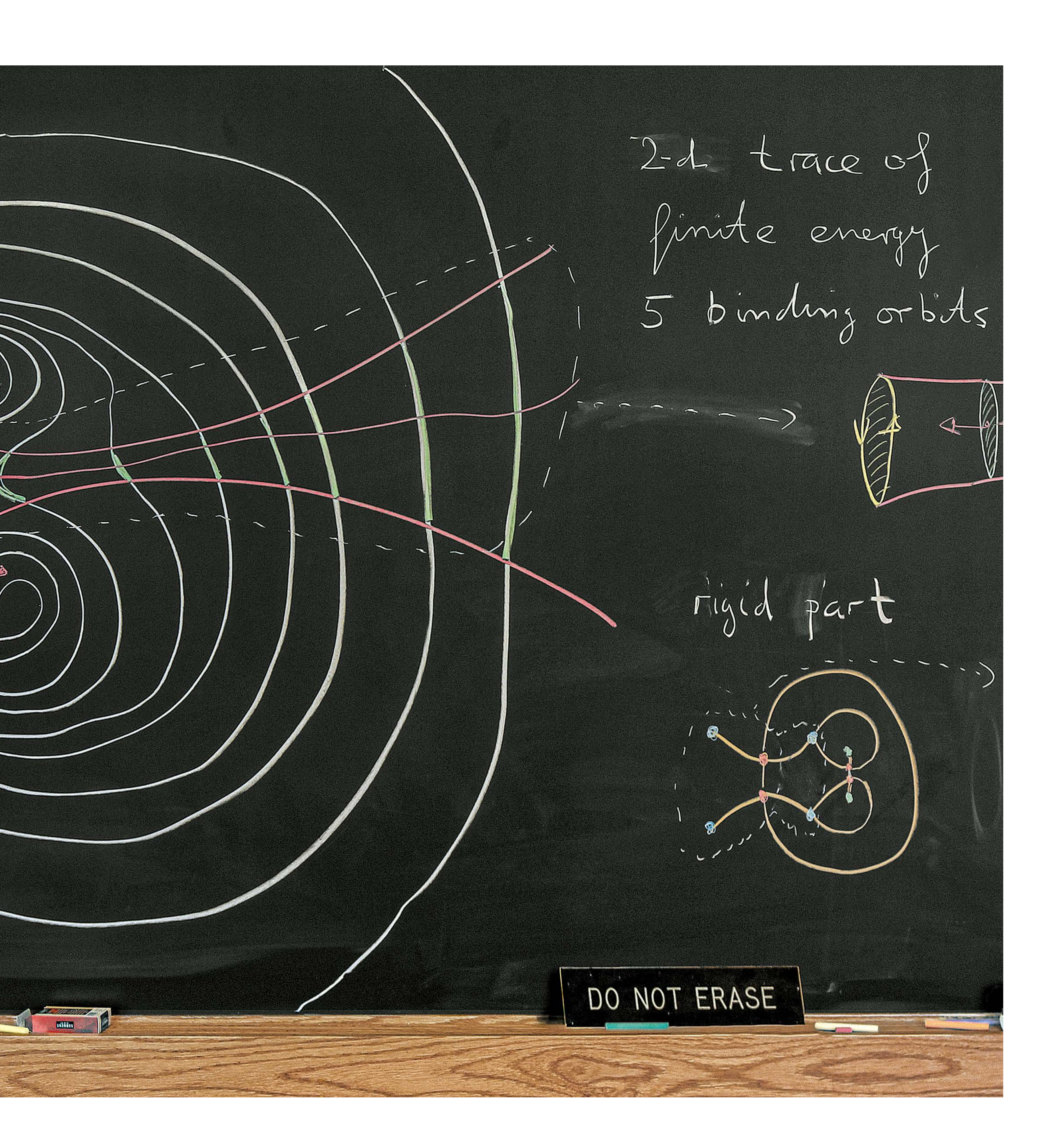
Caminos peatonales

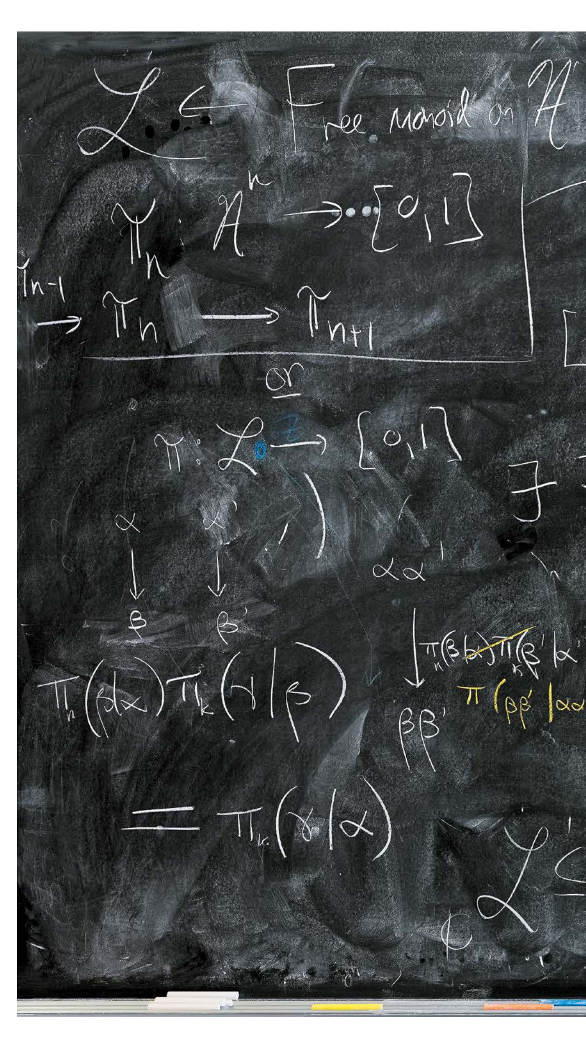
En este «modelo de vértices», cada línea coloreada muestra el camino que sigue un viandante a través de una cuadrícula. Las trayectorias de los peatones no pueden solaparse, así que, siempre que dos de ellos se encuentren, deberán decidir en qué dirección irá cada uno. Pero esa decisión puede estar sesgada: los caminantes con colores más fríos, por ejemplo, pueden tener más probabilidades de dirigirse al este (en vez de al norte) que aquellos de tonos más cálidos. «Aunque su descripción sea sencilla, el comportamiento a gran escala de este sistema es intrincado y se encuentra íntimamente relacionado con varios fenómenos físicos y matemáticos », subraya Alexei Borodin, matemático del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Es posible ampliar estos modelos de vértices para incluir muchos más viandantes y colores. «La combinación de simplicidad engañosa, profundidad oculta y eficacia del análisis matemático hace que este sistema me resulte muy atractivo», señala Borodin, quien también añade «su factor estético».

Caos organizado

En el caos puede haber orden. Entre 1999 y 2003, Helmut Hofer, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, y sus colaboradores desarrollaron un nuevo campo para estudiar ese orden: la dinámica simpléctica. La pizarra de Hofer muestra «foliaciones de energía finita» (*líneas blancas*) que permiten caracterizar el caos de un sistema dinámico, como un satélite que se mueve entre la Tierra y la Luna. Este intrincado conjunto de superficies está relacionado con la evolución de la posición y el momento del satélite a medida que interactúa con la gravedad de ambos cuerpos celestes. Hofer confía en que esta comprensión mucho más profunda del caos «acabe teniendo aplicaciones en el diseño de misiones espaciales». Por ejemplo, algunos estudios habían usado ideas relativas al caos para hallar maneras de ahorrar combustible en la exploración espacial, pero a costa de alargar el viaje. Hofer indica que este trabajo podría reducir aún más el consumo de combustible sin aumentar la duración de la misión.




2-d trace of
finite energy
5 binding orbits
rigid part
DO NOT ERASE



Tazas y rosquillas

Es bien sabido que una taza de café y una rosquilla tienen «la misma forma» desde el punto de vista de la topología, la rama de las matemáticas que clasifica las superficies según su número de agujeros. Dado que tanto la taza como la rosquilla tienen solo uno, y dado que es posible doblarlas y estirarlas hasta obtener la misma forma sin hacer cortes ni perforaciones, ambas son topológicamente idénticas. Del mismo modo, las dos superficies marcadas aquí con un 2 y las dos marcadas con un 6 son básicamente iguales. «Son muy divertidas», asegura Nancy Hingston, matemática del Colegio Universitario de Nueva Jersey que ha estudiado trayectorias sobre estas superficies como parte de su trabajo en geometría diferencial.



Un lugar de encuentro

Las pizarras son con frecuencia las grandes aliadas de la colaboración matemática: lugares visuales y táctiles donde varias personas pueden poner en común sus ideas e intuiciones. John Terilla, del Queens College de la Universidad de la Ciudad de Nueva York, y Tai-Danae Bradley, de X Development (la antigua Google X), trataban de entender qué estructura matemática se esconde tras el lenguaje natural. «Fue la primera vez que hablamos sobre cómo formalizar esa estructura de una manera concreta», rememora Terilla. «Tai y yo estábamos trabajando juntos en la pizarra, que muestra la escritura de ambos. El gran "existe [denotado por ∃] un functor F", por ejemplo, es mío; el "hom(α,β) en [0,1]" que hay debajo es de Tai». Esta investigación forma parte de un proyecto de Terilla para buscar «lo que ocurre entre bastidores a fin de entender lo que vemos», señala. «Aumentar el nivel de abstracción para explicar algo es parecido a desviarse para subir una colina y mirar alrededor: resulta útil en investigación, ya que puede mostrar la manera de adentrarse en territorio inexplorado.»

PARA SABER MÁS

Efficiently learning mixtures of two Gaussians. Adam Tauman Kalai, Ankur Moitra y Gregory Valiant en *Proceedings of the forty-second ACM symposium on Theory of computing*, págs. 553-562, junio de 2010.

KP solitons and total positivity for the Grassmannian. Yuji Kodama y Lauren Williams en *Inventiones mathematicae*, vol. 198, págs. 637-699, marzo de 2014.

Do not erase: Mathematicians and their chalkboards. Jessica Wynne. Princeton University Press, 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Arte y matemáticas. Martin Gardner en *IyC*, marzo de 1978.

Ecuaciones elegantes. Clara Moskowitz en *IyC*, marzo de 2016.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad de París-Sorbona.



¿Por qué camino ir a Marte?

Las trayectorias al planeta vecino han de minimizar el uso de combustible. Un análisis de las órbitas planetarias permite ver que esta oportunidad se presenta cada 26 meses

Al-Amal, Tianwen-1, Perseverance. ¿Qué tienen en común estos vehículos enviados a Marte? Todos ellos han llegado este año y todos partieron de la Tierra a finales de julio de 2020. Esa acumulación en los tiempos de lanzamiento no fue casual. Para llegar al planeta vecino, las sondas espaciales aprovechan una ventana de oportunidad que se abre solo cada 26 meses. Pero ¿por qué esa ventana? ¿Y qué trayectoria siguen las naves que desean llegar al planeta rojo? Un recorrido por las leyes básicas de la mecánica nos permite responder a estas preguntas.

¿Cómo podemos modificar la trayectoria de un objeto que, en principio, obedecería solo a la atracción gravitatoria del Sol y de los planetas? Como es natural, para ello deberemos ejercer una fuerza. Sin embargo, en el vacío del espacio no hay suelo que pisar, agua sobre la que flotar ni aire que pueda impulsarnos. Si excluimos la luz solar (el recurso en el que se basan las velas solares), la única posibilidad que nos queda es el principio de acción y reacción.

Cuando un sistema físico expulsa una masa hacia atrás, la conservación del momento (el producto de la masa por la velocidad) implica que el resto del siste-

LAS TRES MISIONES que han llegado a Marte este año partieron en julio de 2020. Durante aquellas semanas del año pasado, las posiciones relativas de la Tierra y el planeta vecino permitían emprender un viaje que optimizase el gasto de combustible.

ma se verá impulsado hacia adelante. En la práctica, y para los motores de los cohetes, la fuerza de propulsión resultante viene dada por el flujo de masa expulsada (masa por unidad de tiempo) multiplicado por la velocidad de eyección. Esto tiene dos consecuencias.

Por un lado, dicha fuerza no depende de la velocidad que ya haya adquirido el cohete. Es decir, al contrario de lo que ocurre con un automóvil, acelerar no resulta cada vez más difícil. Por otro, los motores de combustión química empleados en las sondas interplanetarias no pueden funcionar de manera continua. Esta limitación se debe a las pequeñas cantidades de combustible que pueden cargarse a bordo, así como al elevado flujo de masa necesario para lograr las aceleraciones requeridas. Como consecuencia, una vez que la sonda se libera de la gravedad terrestre, es como si los motores funcionaran solo durante breves momentos y provocaran cambios instantáneos de velocidad. Para lograr su objetivo, tales variaciones han de tener lugar en puntos muy concretos de la trayectoria.

Optimizar la trayectoria

Para simplificar los cálculos, una vez que la sonda haya partido de la Tierra, olvidemos la atracción gravitatoria que ejercen esta, Marte y los demás planetas e imaginemos que la nave sigue la misma órbita que la Tierra. Eso significa que comenzamos con una trayectoria casi circular alrededor del Sol, por la que avanzamos a la respetable velocidad de 29,8 kilómetros por segundo (km/s).

Un cambio de velocidad transformará esa órbita circular en una elipse con el Sol en uno de los focos, la única trayectoria posible para un objeto atrapado en el campo gravitatorio de una estrella. En una situación así, ¿cómo elegir un cambio de velocidad que optimice la trayectoria final y que nos permita usar la menor cantidad de combustible? En otras palabras, ¿en qué dirección tenemos que apuntar, y cuál es el incremento mínimo de velocidad que debemos conseguir?

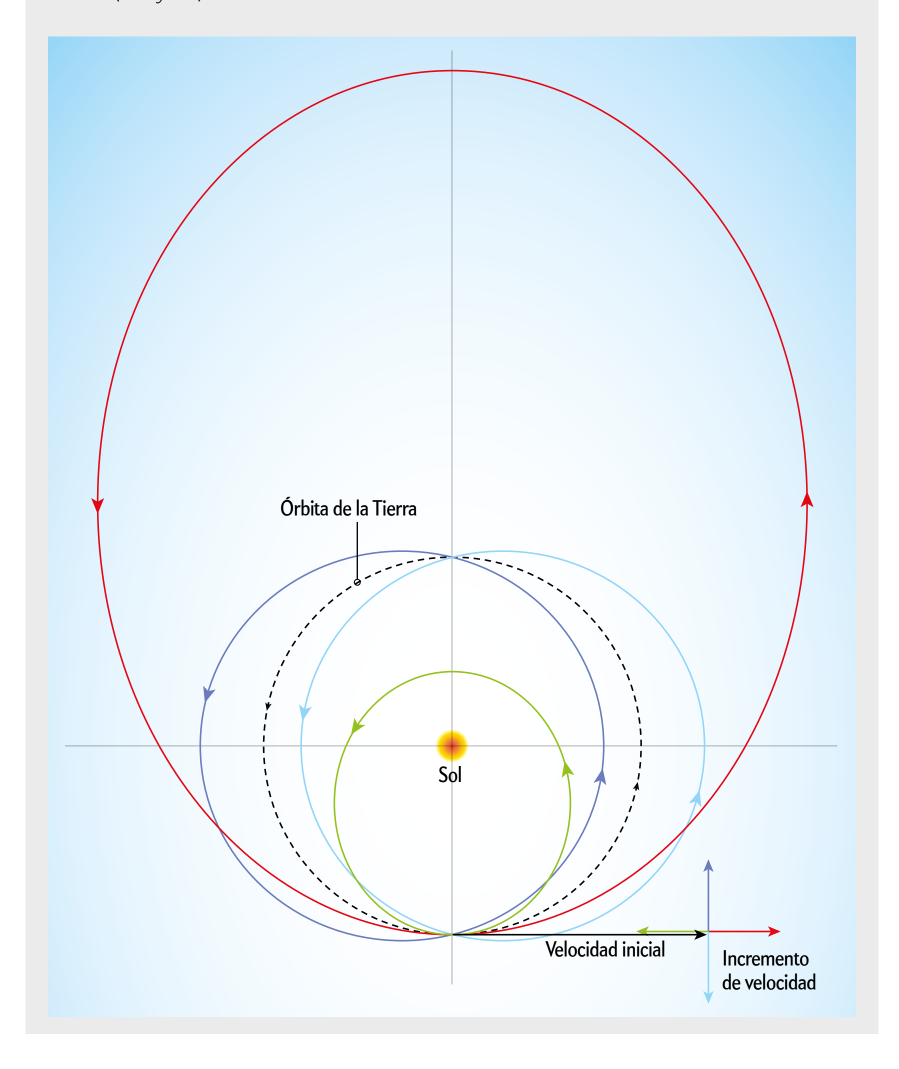
Dado que Marte se encuentra más lejos del Sol que la Tierra, puede que lo primero que nos venga a la mente sea distanciarnos del Sol generando un empuje en sentido contrario a la estrella. ¡Mala idea! En tal caso, la trayectoria resultante será mucho menos eficiente que la que obtendremos con un incremento de velocidad dirigido en el mismo sentido que la velocidad inicial (*véase el recuadro* «Un cambio de velocidad bien dirigido»).

Esto último puede entenderse desde un punto de vista energético. La energía suministrada a la nave por el empuje (que, como hemos visto, resulta independiente de su movimiento) será tanto mayor cuanto más colineales sean dicho empuje y la velocidad. Y para alejarnos del pozo gravitatorio del Sol, tendremos que aumentar todo lo posible la energía mecánica.

Si empujamos en el sentido de avance, optimizaremos ese incremento si este tiene lugar cuando la nave se encuentra en el perihelio; es decir, en el punto de la trayectoria más cercano al Sol. Y el incremento mínimo será aquel para el que el afelio (el punto de la elipse más alejado del Sol) se encuentra sobre la órbita de Marte. Puede verse que esto implica un aumento de velocidad de 2,9 km/s, y que la trayectoria resultante será una semielipse. Dicha trayectoria se conoce como «órbita de transferencia de Hohmann», en honor al ingeniero alemán Walter Hohmann, quien la propuso en 1925 (*véase el recuadro* «Órbita de transferencia de Hohmann»). Este tipo de trayectorias se emplean de manera habitual para transfe-

UN CAMBIO DE VELOCIDAD BIEN DIRIGIDO

EL INCREMENTO DE VELOCIDAD aplicado a una sonda espacial en el momento en que abandona la Tierra situará la nave en una órbita elíptica cuyas características dependerán de la dirección en que se produzca dicho cambio. Cuando el incremento es paralelo a la dirección del movimiento inicial (el de la Tierra), la energía adquirida es máxima y la trayectoria final (*rojo*) presenta su mayor alcance. Está gráfica muestra las órbitas resultantes cuando los incrementos de velocidad se producen en sentido contrario (*verde*) o perpendicular (*azul y lila*) al avance de la Tierra.



ILUSTRACIONES DE BRUNO VACARO

rir satélites desde una órbita baja (a unos 300 km de altitud) hasta una geoestacionaria (a 35.800 km).

Seguir esa trayectoria «óptima» tiene dos consecuencias. Su duración es fija y puede calcularse a partir de las leyes de Kepler: 258 días, o algo menos de nueve meses. Es este tiempo lo que determina la ventana de lanzamiento, ya que, 258 días después de que la misión haya abandonado la Tierra, Marte deberá hallarse en la posición diametralmente opuesta al Sol. Y por supuesto, esto solo será posible si, en el momento de la salida, Marte se encuentra en una determinada ubicación con respecto a la Tierra. Tales condiciones se dan aproximadamente cada 26 meses.

La segunda consecuencia es que, al llegar a la órbita marciana, la velocidad de la sonda será solo de 21,5 km/s. Esto resulta insuficiente para «seguir» a Marte, que avanza a 24,1 km/s. Por tanto, necesitaremos un nuevo aumento de velocidad de 2,6 km/s. Sumado al anterior, ello implica un incremento total de 5,5 km/s. Cabe señalar que es posible hacer el viaje más rápido partiendo en otro momento, pero en tal caso necesitaremos mucho más combustible para transportar la misma carga útil.

Asistencia gravitatoria

Los parámetros de un supuesto viaje de vuelta pueden establecerse del mismo modo, lo que da como resultado una duración total de 974 días, o más de dos años y medio: algo nada despreciable para un astronauta.

Por otro lado, el caso que hemos considerado aquí supone una idealización excesiva, ya que no hemos tenido en cuenta que, antes de quedar sometida exclusivamente a la fuerza gravitatoria del Sol, la nave debe abandonar primero el pozo gravitatorio de la Tierra y, a su regreso, el de Marte. Eso requiere alcanzar velocidades de escape considerables, las cuales ascienden a 11,2 km/s en el caso de la Tierra y a 5,1 km/s en el de Marte. Tales velocidades han de sumarse a los incrementos previos.

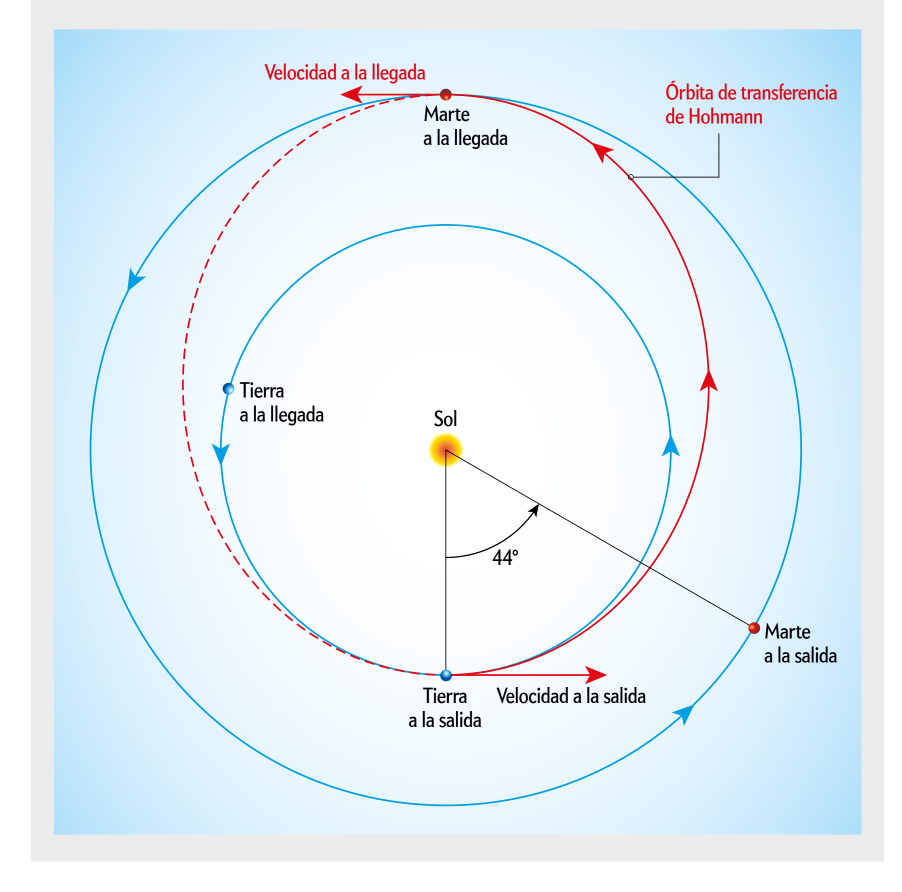
Lo anterior explica por qué puede ser ventajoso elegir un lanzamiento desde una órbita baja. Llevar el cohete a esa órbita sigue costando energía, pero, después, el gasto total puede verse reducido de manera considerable al aprovechar la velocidad ya adquirida.

Por último, la gravedad de los planetas ofrece algunas ventajas. Supongamos que nuestra nave llega a las proximidades de Marte adelantándose a su trayectoria. Si se acerca lo suficiente al planeta, llegará un momento en que la atracción gravitatoria de este será mayor que la del Sol. Decimos entonces que la sonda ha entrado en la «esfera de influencia» de Marte, cuyo radio se estima en unos 600.000 km. Su trayectoria quedará controlada por el planeta y su velocidad aumentará con rapidez a medida que se acerque a este, lo que conlleva el riesgo de colisionar contra él o de rozarlo a más de 5,1 km/s y salir volando hacia el espacio. Por ello, las naves suelen reducir su velocidad hasta alcanzar una órbita baja antes de aterrizar. Contrariamente al caso considerado más arriba, aquí no es necesaria una aceleración, si bien el frenado también requiere energía.

También podemos aprovechar la influencia gravitatoria de Marte para acortar el tiempo de viaje. Dado que, en el afelio, la órbita marciana es tangente a la de transferencia, es posible conseguir que la sonda caiga en el pozo gravitatorio del planeta antes de alcanzar ese punto. En tal caso, la ganancia de tiempo puede ser de hasta un mes.

ÓRBITA DE TRANSFERENCIA DE HOHMANN

LA VENTANA DE LANZAMIENTO más favorable para una misión a Marte tiene lugar cada 26 meses. En la situación representada aquí, los propulsores confieren a la sonda un aumento de velocidad paralelo al avance de la Tierra en el momento de partida. Ello sitúa la nave en una órbita elíptica, conocida como «órbita de transferencia de Hohmann» (*rojo*), la cual cruzará la órbita de Marte en el afelio. En ese momento deberá producirse un segundo incremento de velocidad, a fin de que la nave pueda acompañar al planeta rojo en su órbita alrededor del Sol.



PARA SABER MÁS

Basics of space flight. Ludwik M. Celnikier. Editions Frontières, 1993.

Journey to Mars: The physics of travelling to the red planet. Arthur Stinner y John Begoray en *Physics Education*, vol. 40, págs. 35-45, enero de 2005.

EN NUESTRO ARCHIVO

Autobús interplanetario. James Oberg y Buzz Aldrin en *IyC*, mayo de 2000.

Rumbo a Marte. Damon Landau y Nathan J. Strange en *IyC*, febrero de 2012.

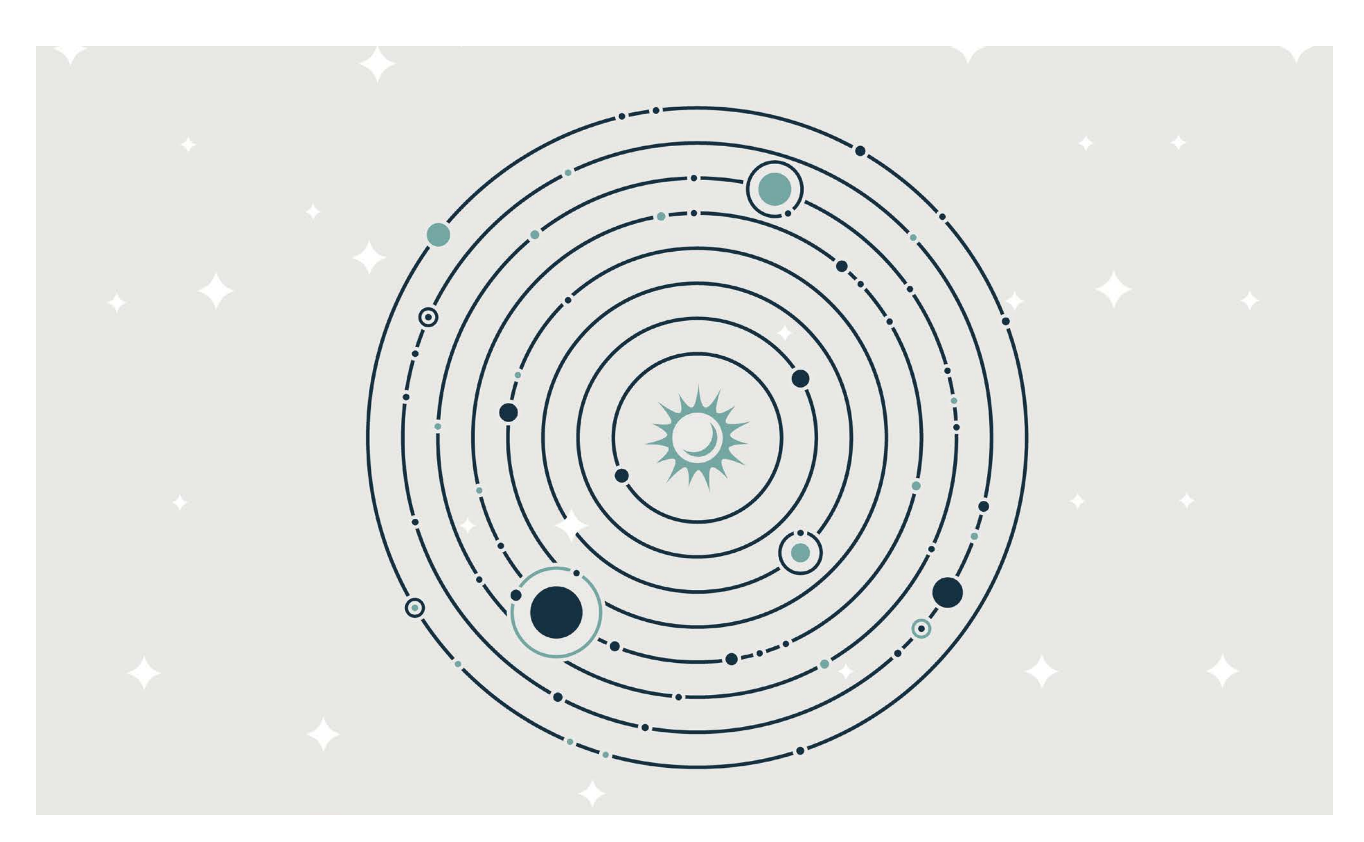
por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



De la órbita de Neptuno a los diagramas de Feynman

La teoría de perturbaciones es uno de los métodos de cálculo más potentes en física. Un sencillo ejemplo con el número áureo permite ilustrar cómo funciona



LA TEORÍA DE PERTURBACIONES nació en el ámbito de la mecánica celeste para resolver de manera aproximada las complejas ecuaciones que gobiernan el movimiento de más de dos cuerpos. Hoy su uso se ha extendido a todos los ámbitos de la física.

GETTY IMAGES/FILO/ISTOCK

A la hora de resolver un problema matemático, la educación que recibimos en la escuela y en el bachillerato se centra en encontrar soluciones cerradas y exactas. Esto genera la falsa expectativa de que esa es la única manera seria de resolver un problema. Sin embargo, la inmensa mayoría de los problemas del mundo real no admiten soluciones de semejante brillo. En los pocos ejemplos «irresolubles» con los que pueda encontrarse un alumno, como alguna ecuación trascendente, la cuestión se solventa invocando el cálculo numérico, lo que, además, suscita la falsa creencia de que esa es la única vía posible en tales casos. Pero lo cierto es que existen potentísimos métodos analíticos, de «lápiz y papel», para resolver muchos de esos problemas. Uno de ellos es la teoría de perturbaciones, una técnica cuya importancia en física resulta imposible de sobreestimar.

A partir de las «perturbaciones», o pequeñas variaciones anómalas, observadas en la órbita de Urano, el matemático francés Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811-1877) dedujo la existencia de un planeta desconocido hasta entonces. Usando las leyes de la mecánica y de la gravitación universal, calculó su masa y su órbita. El 23 de septiembre de 1846, el astrónomo alemán Johann Gottfried Galle (1812-1910) apuntó su telescopio a tan solo un grado de la posición predicha por Le Verrier y descubrió Neptuno. La predicción matemática y el hallazgo del planeta se repitieron en paralelo y de forma independiente con los cálculos del matemático británico John Couch Adams

y las observaciones astronómicas de su compatriota James Challis.

En 1687, Sir Isaac Newton había publicado sus *Principia*, donde se postulaban las tres leyes del movimiento y la ley de la gravitación universal que más tarde emplearían Le Verrier y Adams para predecir la posición de Neptuno. Para ello, estos teóricos tuvieron que enfrentarse a ecuaciones diferenciales carentes de solución exacta, o «no integrables», como dicen los matemáticos. Así que decidieron atacar esas ecuaciones con métodos perturbativos. Tales métodos llevaron de cabeza al propio Newton, quien ya los había explorado al intentar precisar la órbita de la Luna alrededor de la Tierra.

Deformar una solución conocida

Pero ¿en qué consiste la teoría de perturbaciones? Este método se basa en hallar una solución aproximada a aquellos problemas que no sabemos o que no es posible resolver exactamente, partiendo de la solución a un problema más sencillo y que sí sabemos resolver. Un ejemplo típico nos lo proporciona el movimiento de un asteroide bajo la atracción gravitatoria del Sol y de Júpiter: un problema de tres cuerpos que, como es bien sabido, carece de solución general.

Sin embargo, en este caso se da una circunstancia que resulta de enorme ayuda: la masa del Sol es unas mil veces mayor que la de Júpiter. Por tanto, podemos concluir que la órbita del asteroide vendrá dictada esencialmente por la atracción gravitatoria solar, la cual se verá solo ligeramente modificada por el influjo de Júpiter.

Si solo estuviera el Sol, la trayectoria del asteroide sería una elipse. Como consecuencia, el efecto de Júpiter se reducirá a imprimir una pequeña deformación, o perturbación, a esa elipse original. La esencia de la teoría de perturbaciones consiste precisamente en calcular, mediante aproximaciones sucesivas, cómo se produce esa deformación de la solución conocida, o «solución sin perturbar». De hecho, el problema de los tres cuerpos estimuló sobremanera el desarrollo de la teoría de perturbaciones, cuya aplicación al sistema solar ha permitido desde el cómputo de efemérides hasta el cálculo de trayectorias de satélites artificiales, así como el descubrimiento del caos determinista de la mano de Henri Poincaré.

En mecánica celeste y otras áreas, los métodos perturbativos se aplican a sistemas de ecuaciones diferenciales. Para soslayar el tecnicismo que esto acarrea, vamos a ilustrar el método aplicándolo a una sencilla ecuación algebraica de segundo grado que, sin entrar en mayores complicaciones, nos permitirá apreciar en todo su esplendor la filosofía y la potencia de esta técnica.

Cómo calcular el número áureo

Veamos cómo es posible usar la teoría de perturbaciones para calcular, con la precisión que deseemos, el valor del célebre número áureo. Sabemos que este número aparece como solución de la ecuación de segundo grado

$$x^2 - x - 1 = 0 \, .$$

En la escuela nos enseñan a resolver todas las ecuaciones de este tipo a partir de una fórmula cerrada y exacta. Al aplicarla a este caso, llegamos a la solución que buscamos:

$$x = (1 + \sqrt{5})/2 = 1{,}618033...$$

Pero supongamos que no dispusiéramos de esa fórmula general (como sería el caso si, por ejemplo, tuviéramos x^5 en vez de x^2). ¿Cómo haríamos para encontrar la solución?

He aquí la idea. Para resolver nuestro problema, comencemos introduciendo una «perturbación» de valor ε en nuestra ecuación original de la siguiente manera:

$$x^2 - \varepsilon x - 1 = 0 \, .$$

No parece una estrategia muy prometedora, ya que ahora, en vez de una ecuación que no sabemos resolver, tenemos toda una familia infinita de ellas: una para cada valor posible de ε. Pero observemos que, para el caso concreto de $\varepsilon = 0$, nuestra ecuación se convierte en

$$x^2 - 1 = 0 \, ,$$

la cual tiene la enorme ventaja de que es fácil de resolver y conocemos sus soluciones: +1 y –1. Así que, abusando un poco del lenguaje, llamaremos «ecuación perturbada» a la familia de ecuaciones con ε, y «ecuación sin perturbar» al caso concreto que sabemos resolver, correspondiente a $\varepsilon = 0$.

Para cada valor de ε, nuestra ecuación perturbada tendrá una solución, la cual denotaremos $x(\varepsilon)$. Nuestro objetivo es calcular $x(\varepsilon = 1)$, pero por ahora solo conocemos $x(\varepsilon = 0)$. ¿Cómo avanzar?

Series de potencias

La pirueta fundamental es la siguiente: supongamos que $x(\varepsilon)$, la solución genérica para cualquier valor de ε, es una función que podemos expresar como una serie formal de potencias de ε,

$$x(\varepsilon) = a_0 + a_1\varepsilon + a_2\varepsilon^2 + a_3\varepsilon^3 + \cdots \, ,$$

donde los coeficientes a_i son por ahora desconocidos. Y supongamos también que ε es un número pequeño; es decir, menor que 1. En tal caso, cada término de nuestra serie de potencias será menor que el anterior (por ejemplo, si $\varepsilon = 0{,}01$, ε^2 valdrá 0,0001, ε^3 será 0,000001, etcétera). Como consecuencia, cada término sucesivo en nuestra serie de potencias aportará una corrección más y más modesta a la solución.

Además, sabemos que el término independiente ha de ser $a_0 = 1$, ya que este corresponde al caso $\varepsilon = 0$; es decir, a nuestra ecuación no perturbada, para la que sabemos que $x(\varepsilon = 0) = 1$. De modo que el término principal en nuestra serie de potencias, o «aproximación a orden cero», es la solución del problema no perturbado, y el resto de los términos describen la desviación de esta solución causada por la perturbación.

Ahora debemos continuar y calcular la aproximación a orden uno, dada por a_1. Para ello escribimos

$$x(\varepsilon) = 1 + a_1\varepsilon + O(\varepsilon^2) \, ,$$

donde con el símbolo $O(\varepsilon^2)$ indicamos todas las contribuciones proporcionales a ε^2 y potencias superiores de ε. Todos estos términos los despreciaremos en este paso, ya que, si ε es pequeño, serán menores que los proporcionales a ε.

Puesto que estamos conjeturando que esta es la solución de nuestra ecuación perturbada, debe cumplir que

$$(1 + a_1\varepsilon)^2 - \varepsilon(1 + a_1\varepsilon) - 1 = 0 \, .$$

Si desarrollamos esta expresión, obtenemos

$$1 + 2a_1\varepsilon + \boldsymbol{a_1^2\varepsilon^2} - \varepsilon - \boldsymbol{a_1\varepsilon^2} - 1 = 0 \, ,$$

donde hemos marcado en negrita los términos proporcionales a ε^2. Recordemos que estamos despreciando todos estos términos, de modo que lo que nos queda es la ecuación

$$(2a_1 - 1)\varepsilon = 0 \, .$$

De aquí deducimos que $a_1 = 1/2$. Por tanto, nuestra solución a primer orden es

$$x(\varepsilon) = 1 + \varepsilon/2 + O(\varepsilon^2) \, .$$

Si ahora hacemos $\varepsilon = 1$, que corresponde al caso en el que nuestra ecuación general se reduce a la que nos proporcio-

na el número áureo, llegamos a la solución aproximada

$$x(\varepsilon = 1) = 1 + 1/2 = 1{,}5 \,.$$

No es el número áureo, pero se le acerca mucho más que el valor con el que comenzamos, $x = 1$.

Aproximaciones sucesivas

Ahora podemos seguir mejorando nuestra aproximación. Para ello, vamos a segundo orden y postulamos como nueva solución

$$x(\varepsilon) = 1 + \varepsilon/2 + a_2\varepsilon^2 + O(\varepsilon^3) \,,$$

donde aquí despreciaremos los términos proporcionales a ε^3 y las potencias superiores. Si ahora volvemos a introducir esta solución en la ecuación perturbada, $x^2 - \varepsilon x - 1 = 0$, un simple cálculo directo nos lleva a

$$(2a_2 - 1/4)\varepsilon^2 = 0 \,,$$

lo que implica que $a_2 = 1/8$. Para el caso que nos interesa, $\varepsilon = 1$, esto arroja como nueva aproximación al número áureo

$$x(\varepsilon = 1) = 1 + 1/2 + 1/8 = 1{,}625 \,,$$

la cual coincide con el verdadero valor hasta el primer decimal.

Como puede comprobar el lector, al repetir el proceso para la aproximación de orden tres obtenemos $a_3 = 0$. Y si vamos a orden cuatro, nuestra nueva solución será

$$x(\varepsilon) = 1 + \varepsilon/2 + \varepsilon^2/8 - \varepsilon^4/128 + O(\varepsilon^5) \,,$$

que a su vez nos da la aproximación al número áureo

$$x(\varepsilon = 1) = 1 + 1/2 + 1/8 - 1/128 = 1{,}6171875 \,,$$

exacta hasta el segundo decimal. Reiterando el método podremos acercarnos tanto como queramos al valor exacto del número áureo. (Por cierto: como podrá intuir el lector a partir del desarrollo hasta orden cuatro, nuestra serie converge también para el caso $\varepsilon = 1$, lo que justifica haber hecho esta sustitución aun cuando, al principio, habíamos supuesto que ε era menor que 1.)

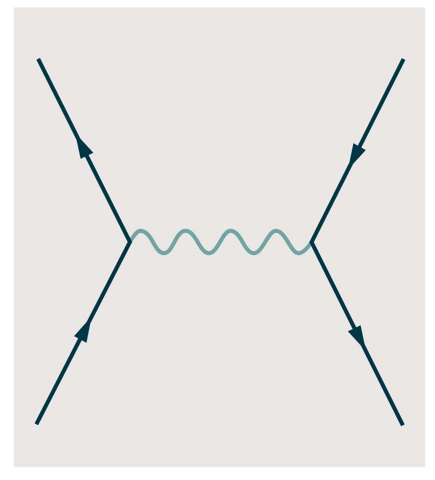
Aquí hemos usado la solución positiva ($x = +1$) de nuestra ecuación no perturbada ($x^2 - 1 = 0$). El lector puede comprobar que, si partimos de la solución negativa, obtendremos aproximaciones sucesivas a la segunda solución de nuestra ecuación cuadrática original.

Más allá de la astronomía

Acabamos de ver un ejemplo del método perturbativo regular. En este caso, de hecho,conocemos la solución exacta de nuestro problema perturbado: la solución positiva es

$$x(\varepsilon) = (\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + 4})/2 \,,$$

cuyo desarrollo de Taylor alrededor del punto $\varepsilon = 0$ coincide con la expansión en serie de potencias que hemos encontrado por el método perturbativo y que, efectivamente, converge para $\varepsilon = 1$.



LOS DIAGRAMAS DE FEYNMAN representan las interacciones entre partículas elementales (*líneas rectas*) mediante el intercambio de partículas virtuales (*línea ondulada*). Estas últimas aparecen como perturbaciones al resolver las ecuaciones de la electrodinámica cuántica.

Si nuestro objetivo es resolver una ecuación diferencial, como ocurre en astronomía, el método perturbativo se aplica de manera semejante: partimos de una ecuación diferencial no perturbada que sabemos resolver y le añadimos una perturbación. En ella introducimos la solución a primer orden (la solución no perturbada más un término lineal desconocido) y despejamos el coeficiente lineal. Después calculamos los órdenes siguientes reiterando el método.

Para acabar, les propongo un reto. Observemos que también podríamos haber «perturbado» nuestra ecuación de segundo grado de la siguiente manera:

$$\varepsilon x^2 - x - 1 = 0 \,,$$

donde, al igual que antes, el caso $\varepsilon = 1$ corresponde a nuestro problema original. Sin embargo, ahora la solución de la ecuación no perturbada ($-x - 1 = 0$) es única, con lo que perdemos una de las dos posibles soluciones. Esto ocurre porque nos encontramos frente a una perturbación singular. ¿Qué sucede en este caso con la serie de potencias?

Si ve lo que pasa, entenderá la naturaleza del cambio de variable $x = \varepsilon^{-1/2}y$, el cual convierte nuestra ecuación en

$$y^2 - \varepsilon^{-1/2}y - 1 = 0$$

y transforma nuestro problema singular en uno regular. ¿Recuperamos las dos soluciones a partir de él?

La teoría de perturbaciones sigue usándose en astronomía para afrontar retos como el estudio de los cuerpos situados más allá de Neptuno, en el llamado cinturón de Kuiper, o a la detección de planetas extrasolares. Pero desde su nacimiento en el ámbito de la mecánica celeste, esta técnica se ha aplicado a multitud de campos de la ciencia. En particular, se ha convertido en una de las principales herramientas en mecánica cuántica, donde es imposible encontrar soluciones exactas a la ecuación de Schrödinger salvo para algunos casos muy idealizados, como el oscilador armónico o una partícula en una caja. En electrodinámica cuántica, el método perturbativo ha permitido algunas de las predicciones más espectaculares de la historia de la ciencia, como el valor del momento magnético del electrón con 11 cifras significativas, y ha dado nacimiento a técnicas como los famosos diagramas de Feynman, que no son sino la representación pictórica de una expansión perturbativa.

El modesto ejemplo que hemos empleado aquí nos revela además que se trata de una estrategia ciertamente contraintuitiva, ya que, para resolver un problema difícil, abordamos una generalización que nos devuelve la solución que buscábamos como un caso particular. Ya ven que, a veces, conviene no tener miedo y pensar a lo grande.

PARA SABER MÁS

Advanced mathematical methods for scientists and engineers: Asymptotic methods and perturbation theory. Carl M. Bender y Steven A. Orszag. Springer, 1999.

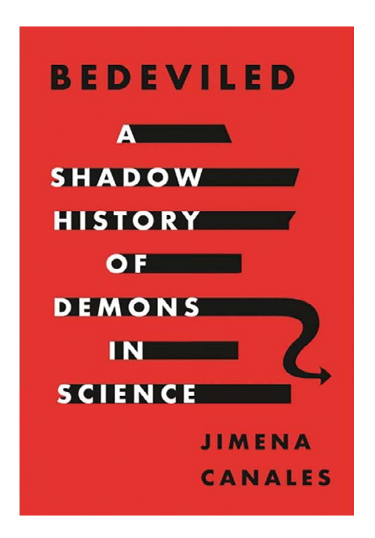
Mathematical Physics 01. Vídeo de Carl Bender sobre series perturbativas. www.youtube.com/watch?v=LYNOGk3ZjFM

EN NUESTRO ARCHIVO

El descubrimiento de Neptuno. William Sheehan, N. Kollerstrom y Craig B. Waff en *IyC*, febrero de 2005.

La física y los diagramas de Feynman. David Kaiser en *IyC*, septiembre de 2005.

El misterio del muon. Lucius Bushnaq, Gregorio Herdoíza y Marina Krstić Marinković en *IyC*, mayo de 2021.



BEDEVILED
A SHADOW HISTORY OF DEMONS IN SCIENCE
Jimena Canales
Princeton University Press, 2020
416 págs.

La ciencia y sus demonios

El papel clave de la imaginación y lo imaginario en el proceso de descubrimiento científico

En ciencia hay una diferencia importante entre los procedimientos de validación empírica y los métodos heurísticos que conducen a la formulación de nuevas ideas y teorías. Si los primeros están sujetos a protocolos rígidos, los segundos no pueden delimitarse sin coartar significativamente la imaginación y la libertad de pensamiento, ambas indispensables en la creación científica. Así pues, se puede afirmar, sin suscribir globalmente el anarquismo epistemológico de Paul Feyerabend, que los vericuetos intelectuales que llevan al descubrimiento no están, ni deben estar, excesivamente señalizados.

De entre las herramientas heurísticas a disposición del científico, el experimento mental probablemente sea una de las más versátiles. Su origen puede trazarse hasta el pensamiento griego (recordemos la alegoría de la caverna o la leyenda del anillo de Giges en *La república* de Platón), y su uso en ciencia se generaliza desde la misma Revolución Científica. Galileo se valió de ellos para formular la ley de caída de graves, al tiempo que la filosofía moderna surgía de otro experimento mental: uno en el que un genio malvado engañaba al dubitativo Descartes haciéndole creer en una realidad exterior inexistente. El recurso fue afianzándose durante los siglos posteriores hasta ser elevado por Einstein a casi la categoría de arte [*véase* «Los experimentos mentales de Einstein», por Sabine Hossenfelder; Investigación y Ciencia, noviembre de 2015].

Hay una clase de experimentos mentales que operan liberando al observador o experimentador de sus limitaciones humanas; algo que con frecuencia implica la introducción de entes ficticios dotados de toda clase de «superpoderes». Un ejemplo temprano lo encontramos en *Somnium*, el relato con que Johannes Kepler inauguró el género literario de la ciencia ficción. Gracias a la intervención de cierto demonio que puede desplazarse a través de la sombra que proyecta la Tierra durante un eclipse lunar, el protagonista viaja hasta nuestro satélite y describe el universo desde allí. Con este experimento mental,

Una de las conclusiones filosóficas del libro es que la categoría de «lo real» es probablemente demasiado estrecha para explicar en toda su profundidad la emergencia de las ideas en ciencia

Kepler pone a prueba el relativismo astronómico copernicano, intentando persuadir al lector de que vivir en un planeta en movimiento no supone un problema mayor del que tendría un imaginario selenita en un mundo orbitando en torno a la Tierra.

Este «demonio de Levania», en referencia al nombre que los selenitas keplerianos dan a la Luna, es uno de los primeros en la larga lista de «demonios», «diablos» o «inteligencias» que han ido surgiendo en la ciencia de los últimos siglos. En *Bedeviled*, la historiadora de la ciencia de la Universidad de Illinois Jimena Canales nos ofrece una estimulante visión de la ciencia moderna desde el papel que estos agentes han desempeñado en la construcción de nuestra visión del mundo, así como en el desarrollo de tecnologías que simulasen sus extraordinarias capacidades [*véase* «Demonios, entropía y la búsqueda del cero absoluto», por Mark G. Raizen; Investigación y Ciencia, mayo de 2011]. Pero el libro de Canales no se limita a ser un catálogo de los demonios de la ciencia y sus transmutaciones a lo largo del tiempo. Antes bien, presenta un análisis profundo de su significado para la historia y la filosofía de la ciencia.

Tomando como punto de arranque el genio malévolo cartesiano, *Bedeviled* repasa una amplia variedad de demonios en física, cibernética, computación, biología o economía, los cuales han sido conocidos por los nombres de sus creadores: Laplace, Maxwell, Darwin, Szilard, Gabor, Monod, Searle... Pero, de toda la plétora de seres imaginarios que desfilan por sus páginas, hay dos particularmente influyentes y que, al reaparecer una y otra vez bajo diversos avatares, han dado lugar a una rica progenie.

El primero de ellos es la «inteligencia» descrita por Pierre Simon de Laplace en su *Ensayo filosófico de las probabilidades* (1814) y que, al llevar cuenta de las posiciones y velocidades de todas las partículas del universo, sería capaz de conocer el pasado y el futuro en todos sus detalles. Esta entidad encarna no solo el determinismo de la mecánica clásica, en cuyo contexto fue formulado, sino el de toda una cosmovisión decimonónica que abarca desde el determinismo histórico marxista al darwinismo predictivo. La misma «máquina diferencial» de Charles Babbage (el primer ordenador mecánico) no es más que un intento de simular las prodigiosas capacidades de la inteligencia laplaciana.

El otro miembro de esta élite demonológica es un diminuto ser de agudos sentidos y rápidos brazos, ideado por James Clerk Maxwell y presentado públicamente en su libro de 1871 *Teoría del calor*. Al seguir el movimiento de las moléculas de un gas, y obrando en consecuencia, este

ente sería capaz de violar la segunda ley de la termodinámica. La mera existencia teórica del demonio de Maxwell abría la posibilidad a un resquicio microscópico que permitiese obtener trabajo útil a partir de un gas a temperatura ambiente.

Tanto el demonio de Laplace como el de Maxwell han gozado de una larga vida. A pesar de que el primero parecería haber sido definitivamente exorcizado a nivel fundamental por la mecánica cuántica, se ha mantenido muy activo. No solo en física (pensemos en las teorías de variables ocultas), sino también en biología. La información cromosómica en el núcleo celular, por ejemplo, se ha interpretado como una suerte de inteligencia laplaciana que conoce con antelación todas las características biológicas del individuo en sus más nimios detalles.

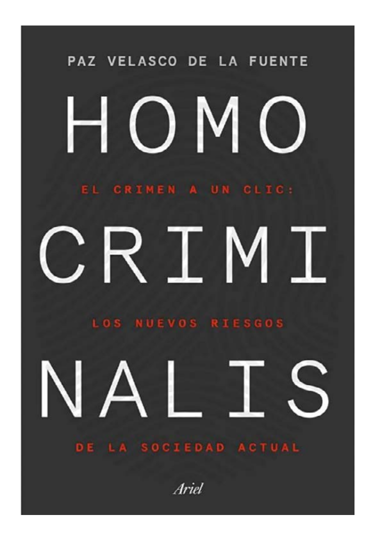
La prodigiosa capacidad del demonio de Maxwell para reducir el desorden ha llevado a identificarlo con reguladores económicos, sistemas educativos o los propios organismos vivos. Con todo, la teoría de la información acabaría localizando un punto flaco en la criatura: su memoria ha de ser borrada periódicamente para dar cabida a nuevos datos. Este proceso irreversible acarrea un aumento de la entropía, por lo que el demonio solo habría conseguido reducir el desorden de forma transitoria [*véase* «Demonios, motores y la segunda ley», por Charles H. Bennett; Investigación y Ciencia, enero de 1988].

Aunque apasionante de principio a fin, las mejores páginas de *Bedeviled* son quizás aquellas en las que Canales ofrece su interpretación de los demonios de la ciencia. Lejos de considerarlos meros instrumentos heurísticos, la autora argumenta que los seres imaginarios que circulan por el libro pertenecen a la narrativa científica precisamente por encarnar aquellos aspectos míticos de la ciencia que con tanta frecuencia han sido ignorados. No hay duda de las marcadas diferencias entre estos nuevos demonios —sobrehumanos, pero sujetos al orden natural— y los viejos demonios sobrenaturales. Pero bajo esas diferencias emerge una sutil continuidad entre ambos tipos de entidades, lo que refleja la ausencia de una divisoria clara entre las concepciones premodernas y el pensamiento científico.

El estudio de la demonología científica nos ofrece una ventana por la que asomarnos a los aspectos más íntimos del proceso de descubrimiento, así como al papel clave que en él desempeña la imaginación y lo imaginario. Esto es algo que la ciencia tiene en común con el arte, y que, como agudamente nos recuerda Canales, en ningún modo disminuye la solidez del conocimiento científico. De hecho, una de las conclusiones filosóficas del libro es que la categoría de «lo real» es probablemente demasiado estrecha para explicar en toda su profundidad la emergencia de las ideas en ciencia.

Bedeviled nos abre los ojos a un interesante y escasamente explorado aspecto de la historia de las ideas científicas. También nos muestra las implicaciones sociales de algunos de los demonios que pueblan el libro, señalando la vigencia de entidades como el genio malévolo de Descartes en la era de las redes sociales. Jimena Canales ha hecho un trabajo impresionante; no solo de recopilación de información, sino especialmente de análisis, interpretación y presentación. El resultado es un libro altamente original e intelectualmente persuasivo, escrito en un lenguaje claro y no exento en ocasiones de lirismo. Una lectura más que recomendable que nos enseña que el «desencantamiento del mundo» del que hablaba Max Weber hace ya más de un siglo no es una tarea en absoluto terminada y, quizá, ni siquiera realizable.

—Miguel Á. Vázquez-Mozo
Departamento de Física Fundamental
Universidad de Salamanca



HOMO CRIMINALIS
EL CRIMEN A UN CLIC: LOS NUEVOS RIESGOS DE LA SOCIEDAD ACTUAL
Paz Velasco de la Fuente
Ariel, 2021
496 págs.

El crimen y la criminología

Un fenómeno que nos apasiona y una ciencia que conocemos poco

En las últimas décadas, la predilección por películas y series sobre investigaciones criminales ha ido en aumento. Esto ha hecho que la televisión y las plataformas audiovisuales se hayan nutrido de numerosos títulos que han hecho las delicias de sus espectadores, hambrientos de una suerte de catarsis y curiosidad por lo sangriento o escabroso. A todos nos sonarán las series *CSI*, *Mentes criminales* o *Mindhunter*. Sin embargo, los crímenes que aparecen en ellas y las funciones que se atribuyen a los investigadores no siempre coinciden con los crímenes más frecuentes de las estadísticas oficiales ni con el desempeño real de la profesión del criminólogo, lo que transmite una imagen muy distorsionada del fenómeno delictivo en general y de la disciplina que supone la criminología en particular [*véase* «Realidad y ficción de la ciencia forense», por Max M. Houck; Investigación y Ciencia, septiembre de 2006].

Estoy convencida de que lo anterior ocurre también con otras temáticas, como las series sobre médicos, donde aparecen patologías muy raras o donde los propios sanitarios acuden a la casa de los pacientes para buscar pruebas clínicas. En todo caso, podemos admitir que la ficción es ficción y no enfadarnos, como tampoco nos enfadamos cuando vemos que las escobas de Harry Potter vuelan, mientras que las nuestras solo atrapan el polvo. El problema surge cuando esa imagen efectista del crimen y de la profesión permea los libros divulgativos, ya que tanto la

población general como las nuevas vocaciones que llegan a las universidades pueden desarrollar a través de ellos unas ideas y expectativas poco realistas. Es decir, cuando al leer sobre ciertos delitos y no otros, los lectores acaben por imaginar las cárceles repletas de asesinos en serie, pederastas y psicópatas.

No obstante, juguemos a conocer mejor esos otros delitos o situaciones violentas, los cuales también existen aunque sean menos frecuentes. En este sentido, *Homo criminalis*, de la criminóloga y profesora de la Universidad Internacional de Valencia Paz Velasco, nos muestra cómo son los célibes involuntarios (*incels*), cómo se desarrolla la relación de los asesinos con la prensa, o explora si existen o no películas de asesinatos reales (*snuff movies*), entre otros delitos algo más frecuentes como el acoso en redes sociales o el contacto en línea entre menores y adultos con fines sexuales (*online grooming*).

La autora ha hecho un esfuerzo por acercar al lector las publicaciones más clásicas y aquellas más recientes sobre el tema, con notable acierto en muchos de los capítulos, aunque también con llamativas ausencias en otros. Y seguramente en aras de combatir la desinformación que rodea determinadas áreas, Velasco acierta al instruir al lector sobre diferencias terminológicas muy relevantes, como la existente entre *pederastia* (acción de agredir sexualmente a un menor, pero sin sentir necesariamente una atracción hacia él) y *pedofilia* (atracción sexual hacia los menores, pero que no necesariamente implica la agresión a una víctima). Este ejercicio pedagógico es sin duda necesario para contribuir a un abordaje serio y realista de tales cuestiones, así como para ayudar a leer de forma crítica los titulares de prensa, algo que sin duda será de gran utilidad para el público general. El público especializado, sin embargo, agradecerá ciertas puntualizaciones pero echará en falta una exposición más variada de las teorías criminológicas o una mayor profundización en otros aspectos.

Este es quizá el tópico en el que incurre *Homo criminalis*: muchos de sus capítulos abordan asuntos de gran interés, pero no siempre con profundidad y en ocasiones con un tratamiento apartado de la escena criminal cotidiana. Reconozco que las películas, las series y los libros podrían volverse aburridos si se alargaran en exceso o si abordaran preferentemente los delitos más acuciantes de la sociedad actual. Pero también considero que serían más realistas y ayudarían a generar imaginarios y vocaciones más ajustadas.

Para hacernos una idea, los delitos más prevalentes en las cárceles españolas son, según datos de Instituciones Penitenciarias y por este orden, aquellos contra el patrimonio (generalmente robos o hurtos), contra la salud pública (sobre todo tráfico de drogas) y de violencia de género. Es decir, el verdadero *Homo criminalis* normalmente roba, trafica o denigra a las mujeres más que imita otros asesinos, actúa de forma sádica o colecciona material abusivo de menores. O al menos así sucede en el mundo occidental. En el libro poca referencia se hace a otras etnias diferentes de la europea y norteamericana, siguiendo la estela de la industria audiovisual y sesgando por tanto la ficticia especie *criminalis* a las sociedades WEIRD (de *western*, occidentales; *educated*, alfabetizadas; *industrialized*, industrializadas; *rich*, con altos ingresos; y *democratic*, democráticas). Sin embargo, el estudio completo del crimen debería incluir una mirada integral y explorar si en otras culturas las conductas y motivaciones criminales son distintas. Al fin y al cabo, *Homo criminalis* es también quien arroja ácido para desfigurar el rostro motivado por lo que considera una deshonra, como sucede en la India y Bangladesh, o quien plancha y aplasta el pecho de las adolescentes para impedir que se desarrollen, como sucede en Camerún.

El verdadero *Homo criminalis* normalmente roba, trafica o denigra a las mujeres más que imita otros asesinos, actúa de forma sádica o colecciona material abusivo de menores

Por otro lado, el subtítulo de la obra (*El crimen a un clic: Los nuevos riesgos de la sociedad actual*) puede hacer pensar al lector que entre sus páginas encontrará un compendio de innovadoras formas criminales, por la alusión a los «nuevos riesgos», y un índice de ciberdelitos, por la alusión al «clic» del ratón. Sin embargo, el índice aborda casos de mediados del siglo pasado, como el de la Dalia Negra, y otros de rabiosa actualidad, como el asesinato masivo de Toronto en 2018, a la vez que combina de forma confusa los delitos fuera de línea (como homicidios o violaciones) con aquellos que se perpetran a través de Internet (como el ciberacoso o el contacto con menores con fines sexuales). De entre estos últimos, tampoco se mencionan los más frecuentes, que según el séptimo *Estudio sobre cibercriminalidad en España*, elaborado por el Ministerio del Interior, son el fraude (88 por ciento) y las amenazas (5,9 por ciento), seguidas de las falsificaciones y la distribución de virus o programas maliciosos. El índice acaba así convertido en un surtido criminal de lo más apasionante pero también de lo más desordenado.

De hecho, el gran talón de Aquiles del libro, y que interfiere con frecuencia en la lectura, es la falta de un cuidado ejercicio editorial: una simple redistribución del contenido de los distintos capítulos habría permitido disponer de una estructura clara con lógica de embudo, donde la introducción general precediese a los casos específicos. Además, la mayor parte de los capítulos presentan finales muy abruptos, sin aportar una conclusión que recoja lo abordado o sin facilitar un enlace con lo que seguirá. Todo esto se une a que hay abundantes ideas repetidas, las cuales podrían haberse detectado, así como una voz narradora que podría haberse mantenido constante en vez de cambiar repentinamente y en varias ocasiones de una tercera forma impersonal a una primera forma subjetiva, entremezclando contenido objetivo con opinión. Estos detalles de forma son relevantes, pues desmerecen un contenido que cuenta con anécdotas muy bien buscadas, ejemplos bien documentados y detalles de interés que no suelen verse en otros libros.

Hablar de crímenes y de quienes los cometen es necesario porque, aunque el sociólogo Émile Durkheim dijera que toda sociedad sana tiene un cierto porcentaje de delitos, no podemos por ello conformarnos y dejar que simplemente existan. Para enfrentarnos a este cometido, la profesión del criminólogo es apa-

sionante y necesaria [*véase* «Ciencia para reducir el crimen», por Rodrigo Guerrero Velasco; Investigación y Ciencia, diciembre de 2015]. Sin embargo, este oficio se encuentra en ciernes en España. Quizá porque nuestro país tiene una de las tasas delictivas más bajas de Europa, o tal vez porque el sector laboral desconoce todas las posibilidades de prevención y detección de amenazas que ofrece esta disciplina, lo cierto es que, hoy por hoy, los egresados sin doble grado encuentran dificultades de inserción laboral. Hasta que el ejercicio profesional sea una realidad imperiosa, conviene estar atentos a las nuevas formas delictivas, asombrosamente cambiantes, y conocer las ya existentes, asombrosamente adaptables, para saber identificarlas y anticiparse a ellas. Este libro proporciona parte de ese conocimiento e invita a que dejemos de ser *Homo criminalis* para convertirnos en *Homo preventis*.

—Nereida Bueno Guerra
Departamento de Psicología
Universidad Pontificia de Comillas

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



QUE NO TE LÍEN CON LA COMIDA
UNA GUÍA IMPRESCINDIBLE PARA SABER SI ESTÁS COMIENDO BIEN
Miguel Ángel Lurueña
Destino, 2021
ISBN: 978-84-233-5875-5
376 págs. (17,90 €)



LA GUÍA DEL ZOÓLOGO GALÁCTICO
LO QUE LA FAUNA TERRESTRE REVELA SOBRE LA VIDA EXTRATERRESTRE
Arik Kershenbaum
Debate, 2021
ISBN: 9788418056048
368 págs. (21,75 €)



EL FIN DE TODO
(ASTROFÍSICAMENTE HABLANDO)
Katie Mack
Crítica, 2021
ISBN: 978-84-9199-275-2
240 págs. (19,90 €)



LAS LEYES DEL AZAR
DE LA ENTROPÍA AL ALGORITMO DE GOOGLE (Y OTROS CAMINANTES ALEATORIOS): CÓMO LA PROBABILIDAD Y LA ESTADÍSTICA EXPLICAN EL MUNDO QUE NOS RODEA
Bartolo Luque y Juan M. R. Parrondo
Shackleton Books, 2021
ISBN: 978-84-1361-025-2
208 págs. (16,90 €)





NANOTECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE
Pedro A. Serena Domingo
Catarata-CSIC, 2021
ISBN: 978-84-1352-221-0
144 págs. (12 €)



SIETE LECCIONES Y MEDIA SOBRE EL CEREBRO
Lisa Feldman Barrett
Paidós, 2021
ISBN: 978-84-493-3796-3
224 págs. (18,90 €)

Recopilación de Mark Fischetti

JULIO

1971

Detener los virus

«Hasta hoy, el único medio clínicamente práctico para controlar las enfermedades víricas es administrar una vacuna que estimule en el organismo la generación de los anticuerpos contra cada virus. Otra posibilidad es confiar en lo que parece ser la primera línea defensiva de las células: el interferón. Nuestro grupo del Instituto Merck se centró en la sustancia activa poli-I:C. Esta se muestra muy prometedora para estudiar el mecanismo interferónico. Tras algunas pruebas finales para descartar el riesgo de trastornos autoinmunitarios, el compuesto poli-I:C estará listo para efectuar en humanos unos cautelosos ensayos sobre prevención de infecciones víricas, tales como el catarro común.»

En 2021 se han estado realizando pruebas con interferón en humanos para el tratamiento de la COVID-19, pero los resultados no son claros.



1971



1921



1871

Marie Curie: el peso de la gloria

«Colmada de honores, madame Curie partió el 25 de junio a bordo del *Olimpic*, al cual se había llevado su preciado gramo de radio. La Oficina de Pesas y Medidas lo proveyó de un hermoso cofre de caoba forrado de plomo y acero. Aunque no grande, pesa casi 60 kilos. El interior está dividido en varios pequeños compartimentos, hechos de plomo y rodeados de acero, adaptados al tamaño de un tubito de vidrio que contiene una porción de las sales de radio. Una placa de oro, incrustada en la tapa, lleva bellamente grabada la siguiente inscripción: "Del presidente de Estados Unidos, en nombre de las mujeres de América, para Madame Marie Sklodowska Curie, en reconocimiento a su trascendental servicio a la ciencia y a la humanidad por el descubrimiento del radio. La Casa Blanca, 20 de mayo de 1921".»

1921

Inmortalidad para los humanos

«Por medios artificiales, un habilidoso cirujano ha mantenido vivo, fuera del animal, un fragmento de tejido del corazón de un embrión de pollo durante más de ocho años. No caben dudas de que, adecuadamente cuidado, podría seguir vivo de forma indefinida. Sumado al trabajo de otros científicos, el significado de esos resultados queda claro: las células individuales no parecen "envejecer". Aunque en teoría seamos inmortales, la causa de que en realidad no lo seamos es que, si una parte del organismo falla, también lo hacen otras dependientes de ella y se colapsa la máquina entera. Pero parece que mientras podamos evitar que alguna pieza se averíe, seguiremos siendo jóvenes y vigorosos. Quizá no esté lejano el día en que la mayoría de nosotros podamos razonablemente esperar cien años de vida. Y si alcanzamos los cien, ¿por qué no mil?»

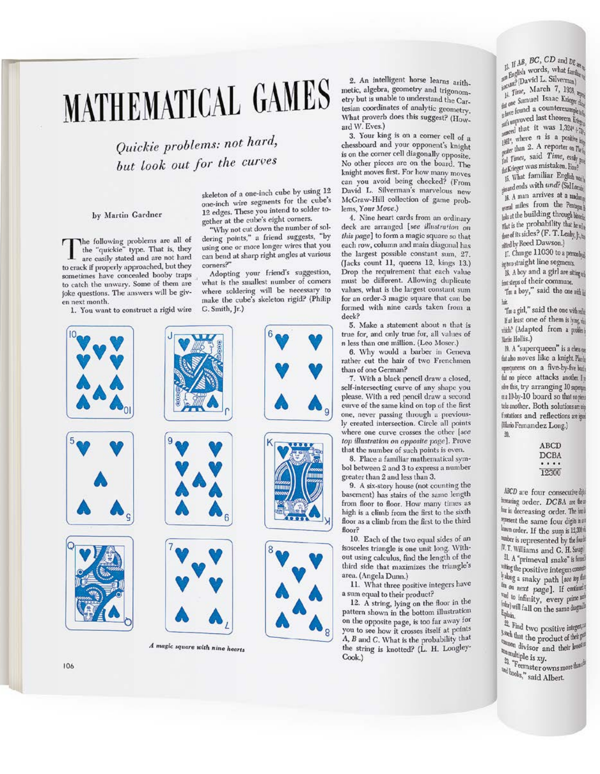
1871

El cálculo sienta bien

«Metafísicos y educadores admiten en su totalidad que el cálculo pone en juego más facultades mentales que cualquier otra rama del aprendizaje. Reconocido este hecho, los profesores deben considerar su institución como un gimnasio que ofrezca a la mente el ejercicio que la capacite para cumplir su más alto destino. Aquí está el valor de la resolución de problemas de cálculo y, de hecho, de todas las demás ramas de las matemáticas puras: al tratar con ideas abstractas, preparan la mente para abordar con rigor asuntos profundos o complicados relacionados con las realidades de la vida.»

Un pozo de gas en el jardín trasero

«En cada habitación de una mansión de Pensilvania había un aparato de gas de pozo, y los incendios podían iniciarse en cualquier momento. En la cocina había toda una instalación. En esa casa, para calefacción e iluminación no se emplea sino ese gas. El pozo está en el jardín trasero, suficientemente separado de la mansión y cubierto por una caseta. El cilindro es de unos 37 metros de hondo, con una tubería de hierro y dotado de una válvula de seguridad.»



MATHEMATICAL GAMES

Quickie problems: not hard, but look out for the curves

by Martin Gardner

The following problems are all of the "quickie" type. That is, they are easily stated and are not hard to crack if properly approached, but they sometimes have concealed booby traps to catch the unwary. Some of them are joke questions. The answers will be given next month.

1. You want to construct a rigid wire skeleton of a one-inch cube by using 12 one-inch wire segments for the cube's 12 edges. These you intend to solder together at the cube's eight corners.

"Why not cut down the number of soldering points," a friend suggests, "by using one or more longer wires that you can bend at sharp right angles at various corners?"

Adopting your friend's suggestion, what is the smallest number of corners where soldering will be necessary to make the cube's skeleton rigid? (Philip G. Smith, Jr.)

2. An intelligent horse learns arithmetic, algebra, geometry and trigonometry but is unable to understand the Cartesian coordinates of analytic geometry. What proverb does this suggest? (Howard W. Eves.)

3. Your king is on a corner cell of a chessboard and your opponent's knight is on the corner cell diagonally opposite. No other pieces are on the board. The knight moves first. For how many moves can you avoid being checked? (From David L. Silverman's marvelous new McGraw-Hill collection of game problems, *Your Move*.)

4. Nine heart cards from an ordinary deck are arranged [*see illustration on this page*] to form a magic square so that each row, column and main diagonal has the largest possible constant sum, 27. (Jacks count 11, queens 12, kings 13.) Drop the requirement that each value must be different. Allowing duplicate values, what is the largest constant sum for an order-3 magic square that can be formed with nine cards taken from a deck?

5. Make a statement about *n* that is true for, and only true for, all values of *n* less than one million. (Leo Moser.)

6. Why would a barber in Geneva rather cut the hair of two Frenchmen than of one German?

7. With a black pencil draw a closed, self-intersecting curve of any shape you please. With a red pencil draw a second curve of the same kind on top of the first one, never passing through a previously created intersection. Circle all points where one curve crosses the other [*see top illustration on opposite page*]. Prove that the number of such points is even.

8. Place a familiar mathematical symbol between 2 and 3 to express a number greater than 2 and less than 3.

9. A six-story house (not counting the basement) has stairs of the same length from floor to floor. How many times as high is a climb from the first to the sixth floor as a climb from the first to the third floor?

10. Each of the two equal sides of an isosceles triangle is one unit long. Without using calculus, find the length of the third side that maximizes the triangle's area. (Angela Dunn.)

11. What three positive integers have a sum equal to their product?

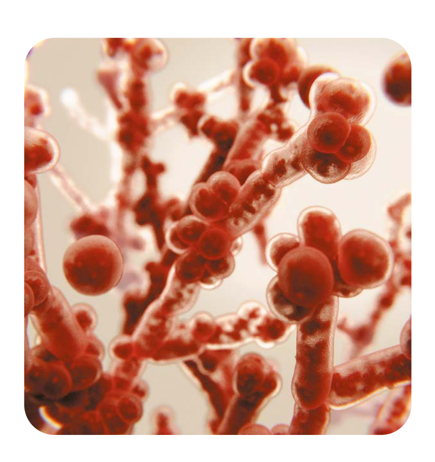
12. A string, lying on the floor in the pattern shown in the bottom illustration on the opposite page, is too far away for you to see how it crosses itself at points *A*, *B* and *C*. What is the probability that the string is knotted? (L. H. Longley-Cook.)

A magic square with nine hearts

106

1971: En la ilustración se muestra un problema con naipes presentado por Martin Gardner en su sección mensual de *Juegos matemáticos*. «Se trata de disponer nueve naipes de corazones formando un cuadrado mágico tal que cada fila, columna y diagonal principal posea la suma máxima posible, 27. (Las jotas valen 11, las reinas 12, los reyes 13.) Permitiendo que se repitan los valores, ¿cuál es la suma constante máxima que puede formarse con nueve naipes de una baraja?»

JEROME KUHL: *SCIENTIFIC AMERICAN*, VOL. 225, N.º 1, JULIO DE 1971

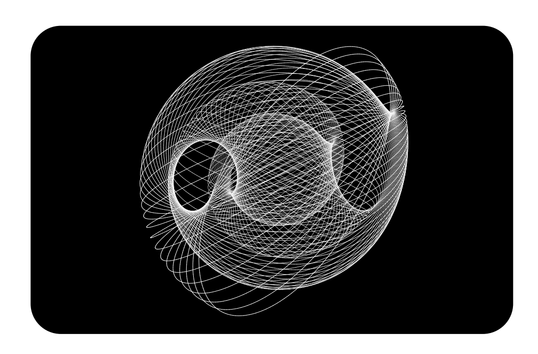


ENFERMEDADES INFECCIOSAS

Hongos mortíferos: la nueva amenaza

Maryn McKenna

Causantes de la muerte de 1,6 millones de personas cada año, ciertos hongos se están erigiendo entre los microbios más letales del planeta.



HISTORIA DE LA MATEMÁTICA

De la manzana de Newton a los drones de Amazon

Fernando Jiménez Alburquerque y Cristina Sardón

El tratamiento matemático de la mecánica clásica ha cambiado de manera notable a lo largo de los siglos. En los últimos años, una formulación en términos puramente geométricos ha dado lugar a nuevas aplicaciones en robótica e ingeniería.

GRAVEDAD CUÁNTICA

La física cuántica reescribe la causalidad

Natalie Wolchover

Varios experimentos recientes han mostrado que es posible mezclar el orden de las causas y sus efectos. El fenómeno ha abierto una nueva vía para explorar el comportamiento cuántico de la gravedad.



SOSTENIBILIDAD

Economías alternativas para un planeta sostenible

Ashish Kothari

Para hacer las paces con la biosfera será necesario crear comunidades y relaciones centradas en la sostenibilidad de la vida, tanto humana como no humana.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz

DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay

DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado

PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau

SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga

SUSCRIPCIONES
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Stephen Pincock
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Martínez: *Apuntes*; Javier Grande: *Apuntes, Un nuevo atlas del universo y Arte con tiza*; Lorenzo Gallego: *¿Fueron asimilados los neandertales por nuestra especie?*; Luis Cardona: *Probióticos para salvar el coral*; Pedro Pacheco González: *El poblamiento de América*; Ana Mozo García: *Filtraciones en la barrera cerebral y Nuevas normas sobre células madre*; Fabio Teixidó: *Caos magnético en la galaxia del Remolino*; Alfredo Marcos: *¿Explicar o predecir?*; José Óscar Hernández Sendín: *Escritores robóticos y El cosmos desde la cara oculta de la Luna*; Ernesto Lozano: *¿Por qué camino ir a Marte?*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España